INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR | AVANCES EN COMPUTACIÓN CUÁNTICA | REVITALIZAR EL SUELO DE ÁFRICA

N.° 478

JULIO 2016

COGNICIÓN ANIMAL
¿Vinculan los animales sexo y reproducción?

EVOLUCIÓN
El ave voladora más grande de la historia

AGRICULTURA
Cómo revitalizar el suelo de África

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

40 ANIVERSARIO 1976 - 2016

Julio 2016 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

Nacido del caos

El sistema solar vivió en su infancia un gran episodio de destrucción interplanetaria

INFORME ESPECIAL

RETOS DE LOS ORDENADORES CUÁNTICOS



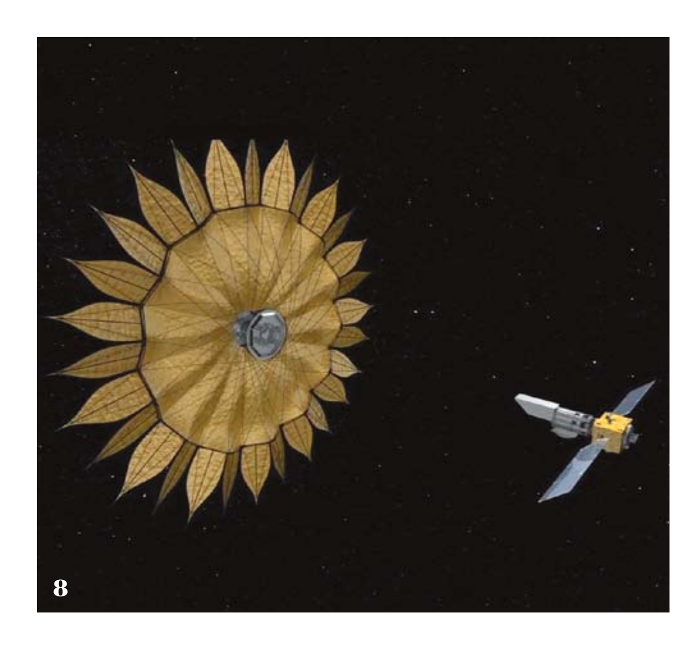
6,90 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Julio 2016, Número 478

ARTÍCULOS

JAMES GURNEY


8


50


55

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Varias investigaciones recientes han revelado que nuestro sistema planetario vivió un episodio de inusitada violencia poco después de su formación. Esta imagen muestra a un joven Júpiter deambulando por el disco de gas y polvo de un Sol recién nacido. Aquella incursión probablemente destruyó varios planetas interiores y despejó el camino para la formación de la Tierra. Imagen de Kenn Brown, Mondolithic Studios.



redaccion@investigacionyciencia.es



Enero y febrero 2016

ENERGÍA OSCURA

En «El Sondeo de la Energía Oscura» [Investigación y Ciencia, enero de 2016], Joshua Frieman da cuenta de los intentos para confirmar si la expansión acelerada del universo se debe o no a la energía oscura. ¿Es posible poner a prueba la hipótesis de que el universo conocido sea, en realidad, parte de un universo mayor y más masivo, el cual sería responsable de la expansión acelerada?

Jack W. Hakala

Frieman señala que interpretar la energía oscura en términos de las contribuciones cuánticas a la energía del vacío adolece de un problema: tales contribuciones no están determinadas, ya que su cálculo arroja un valor 10^{120} veces mayor del que parece observarse experimentalmente. Sin embargo, este embarazoso resultado no invalida el hecho de que, sea como sea, dichas contribuciones probablemente seguirán sin poder despreciarse.

David Reid
Haifa, Israel

Responde Frieman: *Con relación al comentario de Hakala, la idea de un multiverso sigue fascinando a los teóricos. Una propuesta para explicar el ínfimo valor de la constante cosmológica (por qué no es 120 órdenes de magnitud mayor de lo que medimos) postula que esta cantidad tomaría valores distintos en diferentes regiones del multiverso. En la mayoría de ellas sería demasiado grande para permitir la existencia de vida. Solo allí donde la constante cosmológica tomase un valor pequeño, como el que observamos, podría un universo de 14.000 millones de años estar lleno de galaxias y contener vida. Si este «principio de selección antrópica» podrá ponerse a prueba algún día constituye aún una pregunta abierta.*

Reid hace una buena observación. Sea lo que sea la energía oscura, lo más probable es que aún debamos enfrentarnos a la tarea de entender por qué la energía del vacío es tan pequeña. Por ahora, ignoramos si las mediciones efectuadas por el Sondeo de la Energía Oscura ayudarán a aclarar este problema.

MUTACIONES Y OBESIDAD

En «El gen de la obesidad» [Investigación y Ciencia, febrero de 2016], Richard J. Johnson y Peter Andrews señalan que los antiguos simios lograron adaptarse a las hambrunas estacionales gracias a la acumulación de grasa. Según los autores, lo que activó aquel «interruptor de la grasa» fue el azúcar de la fruta (fructosa) obtenido a través de la ingesta de grandes cantidades de fruta.

Al final del artículo, sin embargo, concluyen: «Si redujésemos la ingesta de fructosa *y volviéramos a obtenerla de la fruta fresca*, evitaríamos numerosas enfermedades» (el énfasis es mío). ¿Qué ocurre, entonces? ¿Comer fruta activa el interruptor de la grasa o no?

Tim Cliffe
Emmitsburg, Maryland

Según el artículo, hace millones de años nuestros antepasados perdieron la facultad de producir uricasa: una mutación con claras desventajas, aunque beneficiosa en épocas de hambruna. ¿Hay algún mecanismo similar que explique nuestra incapacidad de sintetizar ácido ascórbico (vitamina C)?

John Pender
Fairbanks, Alaska

Responden los autores: *Con respecto a la primera pregunta, lo que parece una contradicción en realidad no lo es. Hoy nuestra principal fuente de fructosa son los azúcares añadidos, como el azúcar de mesa (sacarosa) y los jarabes de glucosa presentes en numerosos dulces y bebidas azucaradas. La fruta también contiene fructosa, pero la que solemos consumir los humanos tiene mucha menos fructosa y más antioxidantes que las variedades, muy maduras, de las que se atiborran algunos animales, como orangutantes, osos y ciertos peces, a fin de acumular grasa y hacer frente a las hambrunas. Comer fruta fresca nos permitiría disfrutar del sabor dulce que tanto nos agrada sin incurrir en un consumo excesivo de fructosa. Y sus antioxidantes, incluida la vitamina C, pueden bloquear algunos de los efectos de la fructosa.*

En cuanto al segundo comentario, hemos propuesto que la mutación que nos llevó a perder la capacidad para producir vitamina C pudo haber conferido una ventaja adaptativa a nuestros antepasados debido, una vez más, al aumento de la facultad para almacenar grasa. Así visto, los humanos habríamos perdido dos genes —uno relativo a la uricasa y otro relacionado con la capacidad para producir vitamina C— cuya ausencia ayudó a nuestros ancestros en épocas de hambruna pero que, en la actualidad, podría estar incrementando el riesgo de padecer obesidad y diabetes.

Errata corrige

La tabla periódica que acompaña a la nota **Escasez elemental** [por Jennifer Hackett; Apuntes, Investigación y Ciencia, febrero de 2016] hace constar erróneamente el símbolo del titanio (Ti) en la posición del talio (Tl).

En el artículo **Drenaje cerebral** [por M. Nedergaard y S. A. Goldman; Investigación y Ciencia, mayo de 2016], se afirma que el cerebro de un adulto elimina unos 4 gramos de residuos al día, 100 gramos al mes y 1400 gramos (el equivalente al peso del propio cerebro) a lo largo del año. Las cifras correctas son unos 7 gramos al día, 230 al mes y 2800 (dos veces la masa del cerebro) al año.

Estos errores han sido corregidos en la edición digital de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

ASTRONOMÍA

Detectives solares

Un análisis de documentos antiguos obtiene pistas sobre la actividad solar entre los siglos VII y X

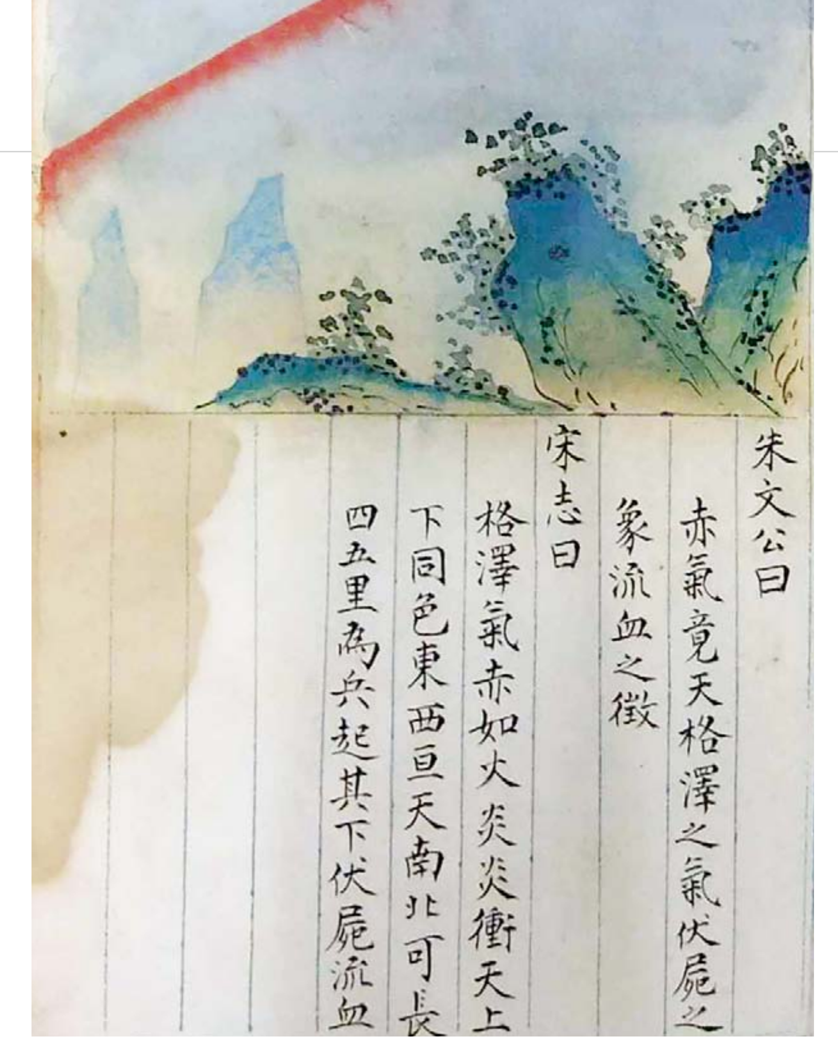


ILUSTRACIÓN PREMODERNA de lo que pudo haber sido una aurora boreal, en un antiguo manuscrito chino.

ARCHIVOS NACIONALES DE JAPÓN

Hasta que Galileo inauguró la astronomía moderna, a principios del siglo XVII, los registros de la actividad solar brillaban por su ausencia. Al menos, así lo creían los científicos. Gracias a un análisis de textos que se remontan hasta el siglo VII, un grupo de investigadores de la Universidad de Kyoto ha encontrado ahora docenas de referencias a lo que parecen ser manchas solares, auroras boreales y otros sucesos relacionados con la actividad del Sol. Sin embargo, están expresadas de un lenguaje que requiere muchas más artes interpretativas que los dibujos de Galileo.

«Aunque para investigar el cambio climático o el tiempo meteorológico del pasado es posible recurrir a sedimentos, testigos de hielo y anillos de crecimiento de los árboles, los fenómenos espaciales y las auroras apenas dejan huella, en caso de que dejen alguna», señala Bruce Tsurutani, físico de la NASA especializado en plasmas que no participó en la investigación. «Así pues, necesitamos información que el ser humano haya registrado por sí mismo.»

Para localizarla, el equipo de Kyoto, compuesto por historiadores y astrónomos, analizó cientos de documentos de la dinastía Tang china, entre los siglos VII y X, así como manuscritos japoneses y europeos de la misma época. En su trabajo, publicado el pasado mes de abril en la edición en línea de *Publications of the Astronomical Society of Japan*, los investigadores refieren haber encontrado una y otra vez expresiones como «arcoíris blancos» y «arcoíris inusuales». Tales eventos aparecían reseñados en las mismas fechas en documentos de las tres regiones. Según el primer autor del trabajo, Hisashi Hayakawa, estudiante de doctorado en la Escuela de Letras de la Universidad de Kyoto, el hecho de que personas en lugares tan distantes informasen a la vez de los mismos fenómenos indicaría que estos solo pudieron ser auroras. Estos resplandores celestes se producen cuando las partículas con carga eléctrica procedentes del Sol chocan contra las partículas de la atmósfera, y suelen adoptar el aspecto de un anillo alrededor de los polos magnéticos de la Tierra.

En documentos antiguos aparecen una y otra vez expresiones como «arcoíris blancos» y «arcoíris inusuales»

El año pasado, el mismo grupo publicó una exhaustiva lista de las menciones más probables a manchas solares en la historia oficial de la dinastía Song china, entre los siglos X y XIII, donde son descritas como ciruelas, melocotones o huevos en el Sol. En total, los investigadores han identificado 38 manchas solares, 13 arcoíris inusuales o blancos y 193 episodios que se asemejarían a auroras boreales. Todos ellos han sido recopilados en una base de datos abierta que admite búsquedas y que puede consultarse en línea.

Hiroaki Isobe, astrónomo y uno de los autores del trabajo, reconoce que no hay forma de saber a ciencia cierta si dichos textos se refieren o no a la actividad solar. La interpretación de expresiones lingüísticas tan arcaicas supone una dificultad única de esta tarea, como lo es también deducir la verdadera naturaleza de sucesos que los autores del pasado interpretaban a menudo como presagios. «[Las descripciones] de tsunamis y terremotos son claras, pero saber qué significa una descripción del estilo de “el cielo estaba rojo” resulta bastante más difícil», explica Hayakawa. El equipo de Kyoto espera reunir más pruebas de sus conclusiones gracias a la colaboración con varios investigadores de Europa, Arabia Saudí y Corea del Sur que también están llevando a cabo estudios históricos sobre manchas solares.

Disponer de un registro de la actividad solar durante un período prolongado podría aportar pistas clave para, por ejemplo, entender mejor el desplazamiento de los polos magnéticos de la Tierra, los posibles efectos de la actividad magnética del Sol en el clima —en caso de que haya alguno— o las fulguraciones solares, potentes llamaradas que pueden arruinar satélites, causar apagones eléctricos y alterar las telecomunicaciones. «Para predecir el futuro, tenemos que conocer el pasado», concluye Isobe.

—Rachel Nuwer



ESPACIO

Viaje a Júpiter

Tras cinco años de travesía, la sonda *Juno* llegará este mes al planeta gigante

La primera nave espacial diseñada para estudiar qué esconde Júpiter bajo su gruesa capa de nubes tiene prevista su llegada al gigante gaseoso el próximo 4 de julio. Bautizada como *Juno*, la sonda intentará estudiar los orígenes y la evolución del planeta, obtendrá información detallada de su longeva tormenta (la Gran Mancha Roja) y enviará las imágenes en color de más alta resolución jamás tomadas del astro.

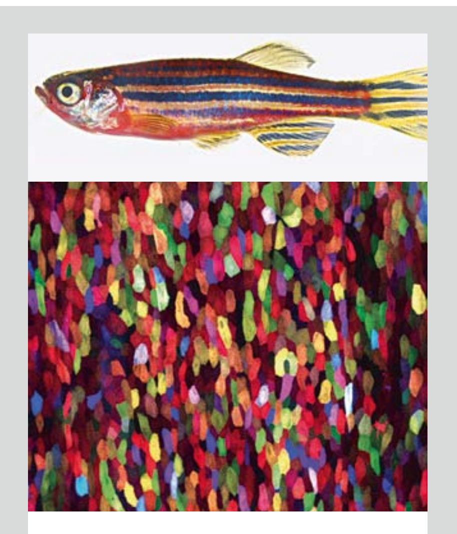
Se cree que Júpiter nació a partir del gas y el polvo residuales de la nebulosa primordial que dio origen al Sol, pero los astrónomos aún ignoran cómo se formó exactamente o incluso si tiene un núcleo sólido. «Saber más acerca de la formación de Júpiter nos permitirá entender mejor cómo se gestaron todos los planetas y cómo fueron los inicios del sistema solar», asegura Scott Bolton, investigador principal del proyecto. A tal fin, los ingenieros de la NASA han programado los múltiples sensores de *Juno* para medir la composición química de la atmósfera del planeta y cartografiar sus campos magnético y gravitatorio. El radiómetro de microondas de la nave «verá», además, hasta 550 kilómetros por debajo de las nubes que cubren la superficie.

Juno es la segunda nave espacial dedicada al estudio del rey de los planetas, después de que la sonda *Galileo* llegase en 1995 y pasase ocho años allí. La visita de *Juno* será, no obstante, mucho más breve: tras 20 meses, la nave descenderá de su órbita y acabará quemándose en la atmósfera del gigante gaseoso.

—*Bryan Lufkin*







BIOLOGÍA CELULAR

Librea multicolor

Si alguien opinara que los peces magenta que nadan raudos en las peceras de Kenneth Poss podrían ser aún más coloridos, debería verlos bajo la luz ultravioleta, cuando se transforman en arcoíris en miniatura. Este biólogo celular de la Universidad Duke y sus colaboradores modificaron genéticamente esta estirpe de peces cebra para que su piel emitiera fluorescencia en todos los colores. En realidad, cada célula cutánea emite una única tonalidad, lo que crea un «código de barras» que permite seguir cientos de células al mismo tiempo. De ese modo es posible observar en el acto cómo responde cada una de ellas a las lesiones y al proceso de curación de las heridas. Tal y como relataba este marzo en *Developmental Cell*, el equipo descubrió que tras una lesión como una abrasión o la amputación de una aleta, algunas células cutáneas del pez adquirían mayor tamaño para compensar la pérdida de las células vecinas. Otras abandonaban su emplazamiento original y se trasladaban a otro para llenar el hueco.

La técnica de coloreado también serviría para entender mejor de qué modo reaccionan las células cutáneas a los fármacos o cómo se comportan cuando devienen cancerosas, explica Poss. «Y esto es solo el comienzo», apostilla.

—*Lydia Chain*

SALUD

Las conexiones globales del zika

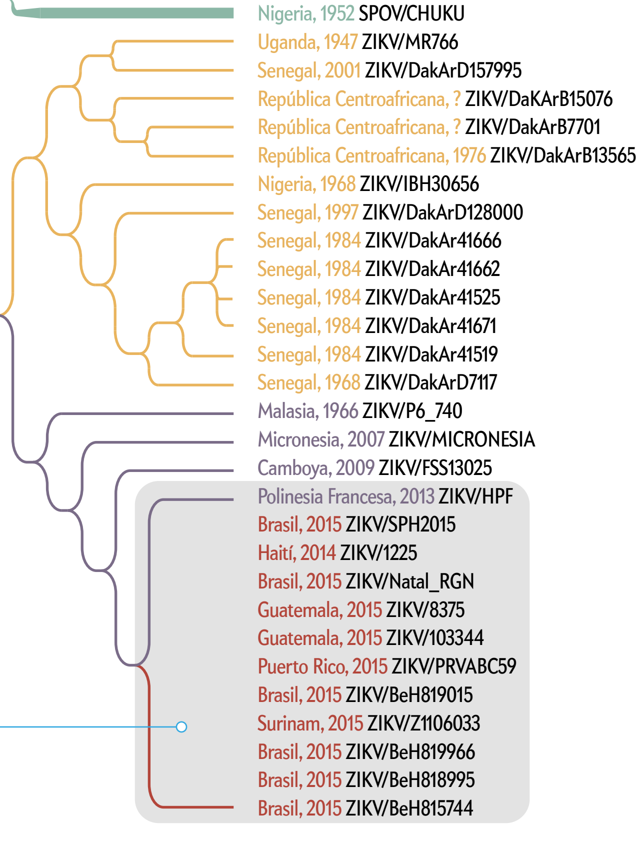
El virus del Zika es más insidioso de lo que las autoridades sanitarias preveían. En estos momentos ya está presente en más de 50 países. Hasta mediados de mayo, siete países o territorios habían notificado casos de microcefalia y otras graves anomalías congénitas vinculadas con este virus, que se transmite a través de la picadura de los mosquitos, las transfusiones sanguíneas o el contacto sexual con personas infectadas. También se puede transmitir al feto durante la gestación.

A pesar de su vasta distribución, conocida desde hace casi 70 años (*derecha*), las diferencias genéticas entre sus cepas son ínfimas (*abajo*), según revela un análisis de investigadores del Centro Médico de la Universidad de Texas, en Galveston. Así, la cepa actualmente activa en América y otra detectada hace años en la Polinesia Francesa son prácticamente idénticas (*grupo del recuadro gris, abajo*). Si el virus ha mutado tan poco en ese tiempo, ¿por qué está mostrando ahora toda su crudeza? Nadie está seguro aún, pero nuevos trabajos con los mosquitos apuntan a que el virus siempre ha sido perjudicial para la salud y ha tenido la capacidad de generar brotes. Por lo tanto, es poco probable que las mutaciones le confieran nuevas aptitudes. Lo más probable es que los organismos de salud pública no supieron apreciar el riesgo que entrañaba, porque hasta hace poco permanecía confinado en lugares remotos.

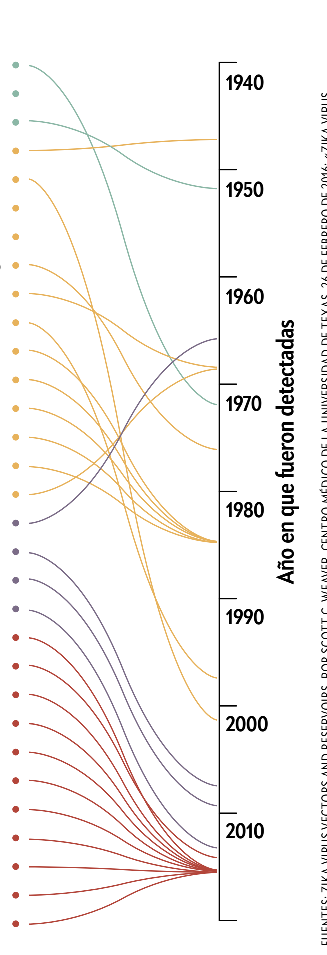
—*Dina Fine Maron*







Desde el punto de vista genético, las cepas del virus del Zika que circulan en estos momentos por el continente americano parecen ser descendientes directas de cepas de origen asiático. Una de las teorías afirma que el virus llegó en 2013 a Brasil en la sangre de un viajero procedente de la Polinesia Francesa.



FUENTES: ZIKA VIRUS VECTORS AND RESERVOIRS, POR SCOTT C. WEAVER, CENTRO MÉDICO DE LA UNIVERSIDAD DE TEXAS, 26 DE FEBRERO DE 2016; «ZIKA VIRUS OUTSIDE AFRICA», POR EDWARD B. HAYES, EN *EMERGING INFECTIOUS DISEASES*, VOL. 15, N.º 9, SEPTIEMBRE DE 2009; CENTROS PARA EL CONTROL Y LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES DE EE.UU.; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfica*)

CIENCIA DE MATERIALES

Un protector solar que se fija a la piel

Dermatólogos y bioingenieros desarrollan una loción que no penetra en el torrente sanguíneo

Bajo el intenso sol del verano, los protectores solares salvaguardan la piel contra las quemaduras, pero algunos de los componentes habituales de ese tipo de lociones y aerosoles pueden penetrar profundamente en la piel y llegar al torrente sanguíneo. Que eso entrañe algún riesgo no está del todo claro, pero Michael Girardi, dermatólogo de la Universidad Yale, cree que vale la pena hallar alternativas. En colaboración con el departamento de bioingeniería de dicha universidad, ha creado una formulación protectora que mantiene las sustancias químicas a flor de piel.

Los componentes de la loción que absorben la dañina radiación ultravioleta suelen ser moléculas orgánicas (en contraposición a los óxidos metálicos que bloquean los rayos del sol en los filtros solares). No hay ningún indicio de que esas moléculas captadoras sean perjudiciales para los humanos. Pero un pequeño número de investigaciones, que engloba estudios en animales y en células cultivadas, revela que algunas pueden unirse a los receptores hormonales. Esos resultados podrían indicar una posible alteración del sistema endocrino, el tránsito de hormonas que regula la reproducción y otras funciones.

En su propósito de crear un protector solar que no se infiltre más allá de la piel, Girardi y su equipo encapsularon moléculas de padimato O, un absorbente de UV habitual, en nanopartículas de un polímero biodegradable que se une a las proteínas de las células cutáneas. Las nanopartículas se adhieren a las células aunque la piel esté mojada y solo se desprenden con la toalla. La nueva formulación protegió la piel del ratón de los rayos UV tan bien como la loción solar habitual de padimato O, según un reciente estudio de Girardi aparecido en *Nature Materials*.

Kenneth Kraemer, dermatólogo del Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU., confiesa estar impresionado por los resultados del proyecto, en el que no ha participado. «Que se reduzca el riesgo de que el filtro solar penetre en la sangre probablemente resulte beneficioso.» Aun así, tendrá que pasar mucho tiempo antes de que la formulación acabe en los bolsos playeros. Este verano Girardi llevará a cabo un estudio piloto, en el que participarán unas 25 personas, para dilucidar el factor de protección solar del nanofiltro a diversas concentraciones. Entretanto, cualquier filtro es mejor que tomar el sol o practicar actividades al aire libre sin protección, para prevenir las quemaduras, las arrugas y los rayos UV cancerígenos.

—*Katherine Bourzac*

THOMAS FUCHS

OBSERVACIÓN ESPACIAL

Cómo ver otra Tierra

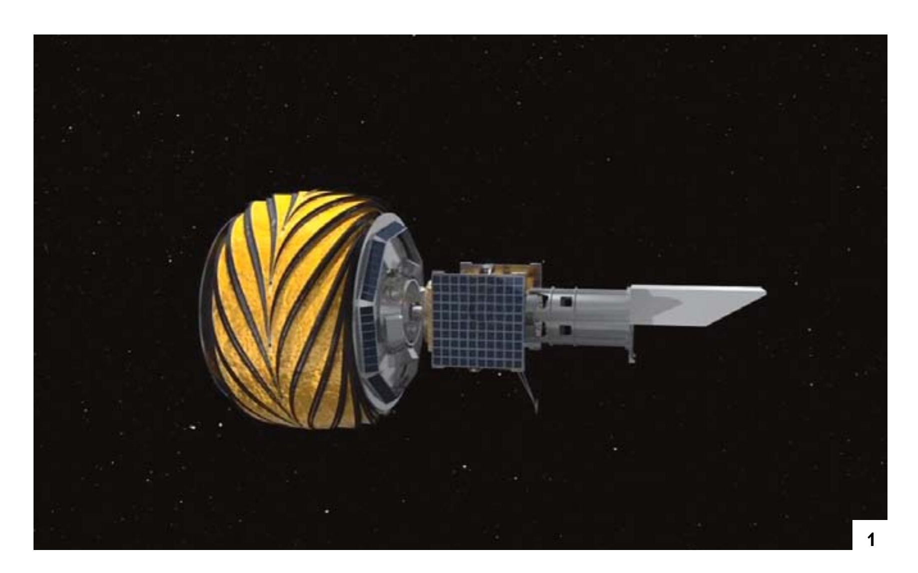
Una gran «sombrilla estelar» podría captar imágenes de mundos potencialmente habitables muchos años antes de lo previsto

¿Podrá el próximo telescopio espacial de la NASA tomar imágenes de planetas semejantes a la Tierra? Hace tiempo que los astrónomos sueñan con ello, ya que así podrían buscar señales de habitabilidad y de vida en mundos más allá del sistema solar. Hasta ahora, sin embargo, siempre ha parecido que la tecnología necesaria para materializar ese sueño tardaría décadas en llegar. Puede que eso cambie dentro de poco: cada vez más expertos creen que el futuro Telescopio de Rastreos Infrarrojos de Campo Amplio (WFIRST) logrará captar imágenes de otras «tierras» mucho antes de lo previsto. La NASA comenzó a trabajar formalmente en el observatorio en febrero de este año y tiene pensado lanzarlo en 2025.

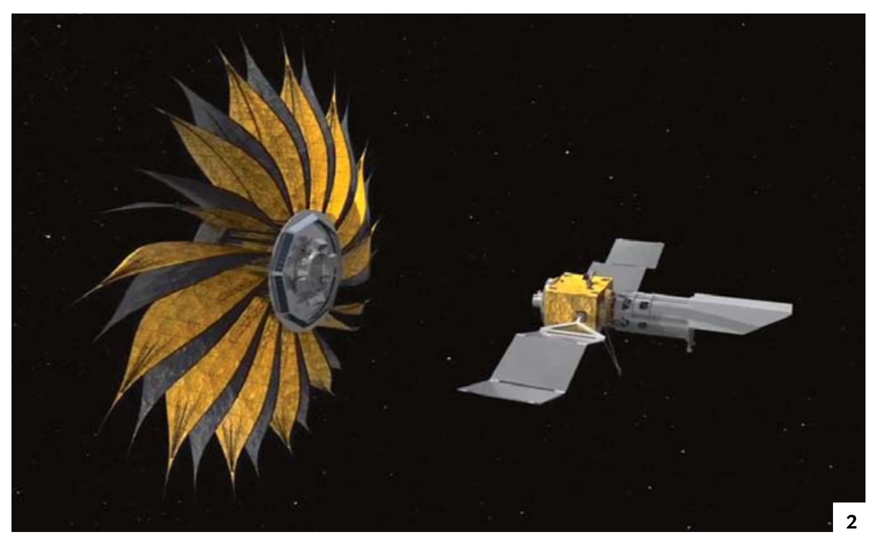
El WFIRST dispondrá de un espejo de 2,4 metros de diámetro con el que, una vez en órbita, los expertos esperan obtener hermosas panorámicas del cielo y esclarecer la naturaleza de la energía oscura, el misterioso agente responsable de la expansión acelerada del cosmos. No obstante, hay otro asunto que ya ha comenzado a influir en la misión: la pregunta existencial de si estamos solos en el universo.

Hasta ahora se han descubierto más de 3000 planetas alrededor de otras estrellas, y durante los próximos diez años los expertos esperan encontrar decenas de miles más. Un razonamiento estadístico simplificado apunta a que, de media, todas las estrellas estarían acompañadas por al menos un planeta, y que quizás una de cada cinco estrellas similares al Sol tenga un orbe rocoso en su «zona habitable», la región no demasiado fría ni demasiado caliente donde podría existir agua líquida. La mejor forma de averiguar si esos mundos se parecen a la Tierra es verlos. Sin embargo, obtener imágenes de un planeta que está a años luz de distancia no es precisamente sencillo: un mundo lejano se ve como un tenue punto perdido entre la cegadora luz de su estrella anfitriona, mucho mayor y 10.000 millones de veces más brillante.

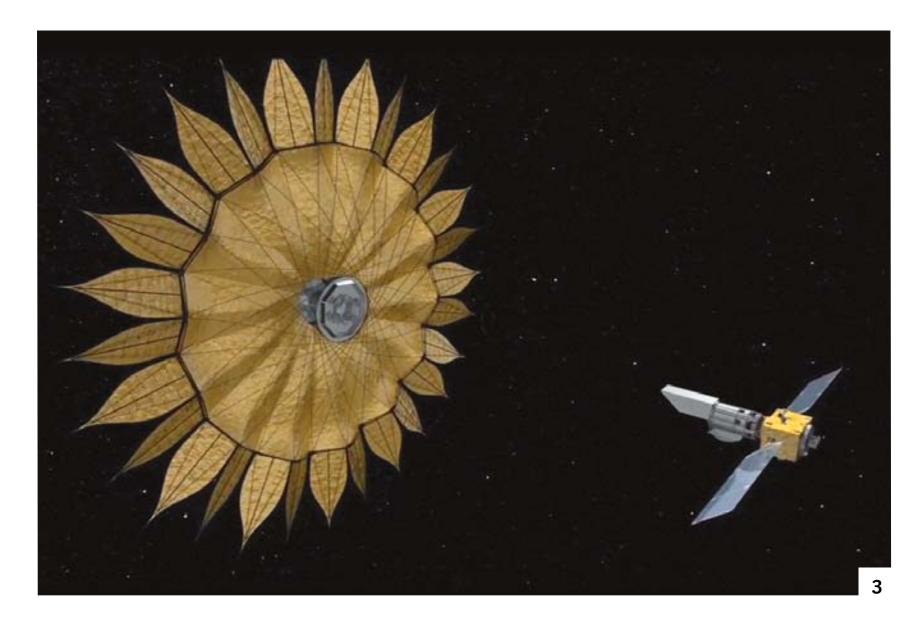
Otro obstáculo que impide tomar imágenes de planetas lejanos desde los observatorios terrestres es la turbulenta atmósfera de la Tierra, la cual emborrona la luz de las estrellas. La mayoría de los expertos



1



2



3

ESTA SECUENCIA DE IMÁGENES muestra la puesta en funcionamiento de una sombrilla estelar junto a un futuro telescopio espacial. Al principio estaría plegada para su lanzamiento al espacio (*1*). Llegado el momento, se desprendería y se desplegaría (*2*), para luego alejarse (*3*) a decenas de miles de kilómetros del telescopio.

NASA/JPL-CALTECH

coinciden en que la solución pasará por los observatorios espaciales. Pero tanto el Hubble como su enorme sucesor, el telescopio espacial James Webb, cuyo lanzamiento está previsto para 2018, están muy lejos de alcanzar el altísimo contraste necesario. El WFIRST, en cambio, contará con un avanzado coronógrafo para la toma de imágenes planetarias, un instrumento que filtrará la luz estelar gracias a una compleja serie de máscaras, espejos y lentes. Con todo, este aparato fue un añadido tardío al WFIRST. El telescopio no está optimizado para un coronógrafo, por lo que la mayoría de los expertos creen que no alcanzará el contraste necesario para captar imágenes de otros mundos. Conseguirlas se antoja tan difícil que los planes provisionales de la NASA llaman a posponer dicho objetivo veinte años o más, un margen de tiempo que permitiría desarrollar la tecnología necesaria y lograr un respiro presupuestario para abordar la construcción de un telescopio espacial completamente nuevo tras el WFIRST.

No obstante, el atajo podría provenir de una técnica conocida como «sombrilla estelar»: una pantalla con forma de girasol, no más gruesa que una hoja de papel y tan grande como un campo de fútbol, la cual se desplegaría a decenas de miles de kilómetros del WFIRST y bloquearía la luz de la estrella que aloja el planeta objeto de estudio; algo parecido a tapar el Sol con un pulgar extendido cuando miramos al cielo. Las sombrillas estelares funcionan con casi cualquier telescopio, y una que acompañase al WFIRST arrojaría una sombra más espesa y dejaría ver planetas más tenues y cercanos a su estrella que un coronógrafo. Con una sombrilla, el telescopio podría tomar imágenes de unos 40 planetas, algunos de los cuales tendrían tamaños y órbitas similares a los de la Tierra. «Si y solo si el WFIRST tiene una sombrilla estelar, podrá ofrecernos imágenes de verdaderas tierras azules a finales de la próxima década, en lugar de tener que esperar otros veinte años más», señala Jeremy Kasdin, catedrático de la Universidad de Princeton y científico jefe del coronógrafo del WFIRST. «Tenemos una oportunidad real de encontrar otra Tierra más pronto y con menos dinero, antes de hacer una inversión enorme en el siguiente telescopio espacial.»

Aunque faltan casi diez años para el lanzamiento del WFIRST, la decisión de poner en marcha los preparativos para una sombrilla estelar deberá tomarse pronto, ya que en tal caso serían necesarias algunas modificaciones para que el telescopio pueda sincronizarse con la sombrilla a través de decenas de miles de kilómetros en el espacio.

Como tal, aún no existe una misión oficial para la sombrilla. Paul Hertz, director de la división de astrofísica de la NASA, explica que, por el momento, la agencia opera en modo de «no descartar la sombrilla estelar». Pero no descartarla se está pareciendo bastante a un esfuerzo concertado para construirla: cuando la NASA anunció el comienzo formal del WFIRST, también confirmó que sería puesto en órbita a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra, una zona lo bastante tranquila para permitir el funcionamiento de una sombrilla. Además, la agencia creó hace poco un grupo de trabajo para evaluar la viabilidad de una sombrilla, a la que ha designado oficialmente como «actividad de desarrollo tecnológico». Tales pasos podrían acelerar las cosas.

Tanto es así que, en los sótanos del vasto Laboratorio de Química Frick de Princeton, Kasdin trabaja ya en un tubo de un metro de ancho y 75 de largo con una cámara en un extremo, un láser en el otro y una sombrilla estelar a escala en el medio. Para finales del verano, augura, este banco de pruebas exhibirá una relación de contraste que, a la verdadera escala de la sombrilla, permitirá captar imágenes de planetas parecidos a la Tierra. Mientras, la compañía aerospacial Northrop Grumman ha ensayado sombrillas estelares en miniatura en el lecho seco de un lago de Nevada y en un telescopio solar gigante de Arizona. Y en el Laboratorio de Propulsión a Chorro, de la NASA, se están efectuando demostraciones sobre cómo fabricar los delicados pétalos de la sombrilla, plegar toda la estructura para que quepa en un cohete, separarla y desplegarla.

Sin embargo, no todos los obstáculos son técnicos. Una sombrilla para el WFIRST costaría fácilmente unos 1000 millones de dólares: demasiado dinero para cargarlo al presupuesto del telescopio, por lo que habría que proponerla y aprobarla como un proyecto independiente. Se trata de un obstáculo considerable para una tecnología aún en ciernes. No obstante, los réditos serían históricos: la primera imagen de una Tierra alienígena es algo que solo sucede una vez. ¿Debería intentar hacerse tan deprisa como sea posible, o es mejor esperar varias décadas? La NASA y la comunidad astronómica tendrán que decidirse pronto.

—*Lee Billings*

ETOLOGÍA

La luz no atrae a todas las polillas

Varias polillas urbanas han desarrollado aversión a las farolas, pero ¿tiene sentido esta adaptación?



Algunas polillas que pululan en las urbes bañadas por la luz no se sienten atraídas por ella, asegura un nuevo estudio publicado en *Biology Letters*. Mientras cursaba los estudios de posgrado en Basilea, el biólogo evolutivo Florian Altermatt fijó su atención en el número de insectos nocturnos que revoloteaban a la luz de las farolas. «Quería saber sobre todo a qué especies atrae y me percaté de que en la ciudad no eran tantas», explica Altermatt, ahora en la Universidad de Zúrich. Los datos quedaron arrinconados durante la tesis doctoral, pero la idea de que los insectos urbanos podían ser insensibles al funesto señuelo de la luz no dejó de rondarle la cabeza. Cinco años después, en colaboración con Dieter Ebert, ambientólogo de la Universidad de Basilea, decidió estudiar el asunto con el debido rigor.

En primer lugar, recolectaron orugas de arañuelos (*Yponomeutidae*) en zonas urbanas y rurales de Francia y Suiza y las criaron hasta la madurez. A continuación, liberaron a la vez todas las polillas adultas (320 campestres y 728 urbanas) en una sala oscura dotada de una lámpara fluorescente en el extremo opuesto. Casi todas las nacidas en el campo volaron hacia ella, pero solo dos tercios de las urbanas las secundaron. Las demás permanecieron cerca del punto de partida, lejos de la luz.

Esos resultados parecen revelar una adaptación evolutiva a las zonas afectadas por la contaminación lumínica. Tal actitud salvaría la vida de muchas: cada noche, los insectos que mueren de inanición en una sola farola se cuentan por miles, según estudios precedentes. Pero tal comportamiento también tendría sus desventajas. «Dudo de que esa adaptación compense realmente el daño causado por la contaminación lumínica», matiza Altermatt. En su intento de evitar las luces brillantes, las polillas urbanas podrían quedar confinadas a pequeños reductos donde polinizarían menos plantas y tendrían más dificultades para hallar pareja.

—Jennifer Hackett

ENERGÍA

Uranio en el agua

El agua del mar podría convertirse en una fuente fiable de combustible para los reactores nucleares

Los mares contienen uranio suficiente para suministrar energía a las principales ciudades del mundo durante miles de años. El problema radica en cómo extraerlo. Un proyecto financiado por el Departamento de Energía de EE.UU. ha referido notables progresos al respecto: basándose en el trabajo previo de investigadores japoneses, los laboratorios de Oak Ridge y del Pacífico Noroeste han creado un material que permite extraer el uranio del agua de mar. El nuevo material se compone de fibras de polietileno trenzadas y recubiertas con amidoxima, un compuesto que, en el agua de mar, atrae el óxido de uranio y se enlaza con él en la superficie de las trenzas. Estas miden unos 15 centímetros de diámetro y presentan una longitud que puede alcanzar varios metros en función de dónde se coloquen. Luego, un tratamiento con ácido extrae el uranio en forma de iones uranilo, un producto que debe ser procesado y enriquecido para convertirlo en combustible. Los resultados aparecieron publicados esta primavera en *Industrial & Engineering Chemistry Research*.

El procedimiento aún es caro e ineficiente. Pero, según Stephen Kung, miembro de la Oficina de Energía Nuclear del Departamento de Energía de EE.UU. que no participó en el proyecto, encontrar nuevas formas de obtener uranio constituye un paso necesario para planificar el futuro de la energía nuclear. Se cree que las fuentes terrestres de uranio solo durarán un siglo más. «Con este recurso hay que mirar lejos», observa Kung.

—Jennifer Hackett

EN CIFRAS

3,3
MICROGRAMOS POR LITRO
Concentración de uranio en el agua de mar

4000
MILLONES DE TONELADAS
Cantidad estimada de uranio en los océanos

6
GRAMOS
Peso del uranio extraído por kilogramo de material adsorbente

8
SEMANAS
Tiempo requerido para extraer 6 gramos

27.000
KILOGRAMOS
Cantidad de uranio que necesita una central nuclear de un gigavatio para funcionar durante un año

ASHLEY COOPER, ALAMY (*imagen superior*); GETTY IMAGES (*imagen inferior*); FUENTES: COSTAS TSOURIS, LABORATORIO NACIONAL DE OAK RIDGE (*primer, tercer y cuarto dato*); COSTAS TSOURIS, LABORATORIO NACIONAL DE OAK RIDGE STEPHEN KUNG, OFICINA DE ENERGÍA NUCLEAR, DEPARTAMENTO DE ENERGÍA (*segundo dato*); WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (*quinto dato*)

ORGANISMOS MODELO

Los ratones de laboratorio son demasiado pulcros

Si se mezclaran con ratones «desaseados» procedentes de las tiendas de animales, los modelos humanos mejorarían

Los investigadores suelen encargar por Internet los ratones de laboratorio, pero ahora el inmunólogo David Masopust ha venido a ponerlo todo patas arriba. Hace unos años, mientras trabajaba en la Universidad Emory, se desplazó hasta una granja situada a unas horas de allí para capturar él mismo los roedores. Sospechaba que los ratones de laboratorio comerciales estaban perdiendo leucocitos esenciales debido a la inexperiencia de su sistema inmunitario, como consecuencia de la crianza en instalaciones impolutas. Masopust, ahora profesor de la Universidad de Minnesota, decidió contrastar sus sospechas y, tras una década de trabajo, sus conclusiones le dan la razón: los ratones de laboratorio usados por la comunidad científica y el sector farmacéutico para ensayar los fármacos y las vacunas humanas son, en cierta manera, modelos deficientes del sistema inmunitario maduro del ser humano.



THOMAS FUCHS

Un estudio explicaría en parte por qué los medicamentos estudiados en animales fracasan a menudo en los ensayos humanos

Tal y como relataba la pasada primavera en *Nature*, su equipo ha descubierto que los ratones criados en los asépticos estabularios presentan un sistema inmunitario más parecido al de un bebé que al de un adulto, a juzgar por los tipos de leucocitos presentes y los genes activos en ellos. Así, los linfocitos T de memoria CD8+, los primeros que se movilizan contra las infecciones, eran prácticamente indetectables en los ratones adultos de laboratorio, pero no en los congéneres procedentes de las granjas y de las tiendas de animales. «Ya lo intuíamos, pero es bueno contar con pruebas que lo demuestren», confiesa Purvesh Khatri, experto en inmunología y biología computacional de la Universidad Stanford, ajeno al estudio.

Y lo que es más, cuando los investigadores mezclaron los ratones de laboratorio «pulcros» con los ratones de tienda de animales «sucios» (portadores de gérmenes), cerca de una quinta parte de los primeros murió a causa de infecciones en pocos meses. Los supervivientes, empero, desarrollaron un repertorio inmunitario más robusto, y la actividad génica de sus leucocitos cambió hasta devenir similar a la correspondiente en adultos humanos. En experimentos de seguimiento, dichos ratones combatieron las infecciones bacterianas tan bien como los ratones vacunados contra los patógenos causales.

Estos resultados hacen suponer que si los ratones de laboratorio compartieran su espacio con congéneres silvestres o procedentes de tiendas de animales, se tendría una visión más fidedigna de la evolución de la enfermedad y de la respuesta al tratamiento en los adultos humanos. Además, al poner de relieve que los ratones de laboratorio distan de emular fielmente ciertas características inmunitarias esenciales, el estudio explicaría en parte por qué los medicamentos ensayados en los animales fracasan a menudo en los estudios con humanos. «Hay variables relevantes del mundo real que no están presentes en los experimentos controlados», aclara Khatri.

—Esther Landhuis

AGENDA

CONFERENCIAS

5 de julio
Los australopitecinos del sur de África
Roberto Sáez, divulgador científico
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.sam.mncn.csic.es > conferencias

EXPOSICIONES

Hasta el 20 de julio
Los inventos de Leonardo
Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es > exposiciones



Hasta el 20 de julio
El universo para que lo descubras
Casa del Almirante
Tudela
www.ciudadciencia.es > agenda

Imaginar la educación: 50 años con Frato
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com > exposiciones

OTROS

1, 8 y 15 de julio – Actividades
ArqueUB: Com vivien els veïns del Raval de segles passats
Actividades divulgativas sobre arqueología
Facultad de geografía e historia
Universidad de Barcelona
www.ub.edu/laubdivulga > activitats

23 de julio – Cine
Descubre el cine científico: Ciencia para la conservación
Asociación Minerales Monteluz
Almuñécar
https://fundaciondescubre.es > agenda

BIOLOGÍA MARINA

El bentos antártico, afectado por el cambio climático

Este ecosistema de los fondos marinos se ve alterado por la sedimentación asociada al retroceso de los glaciares, más que por el ascenso en sí de las temperaturas

RICARDO SAHADE

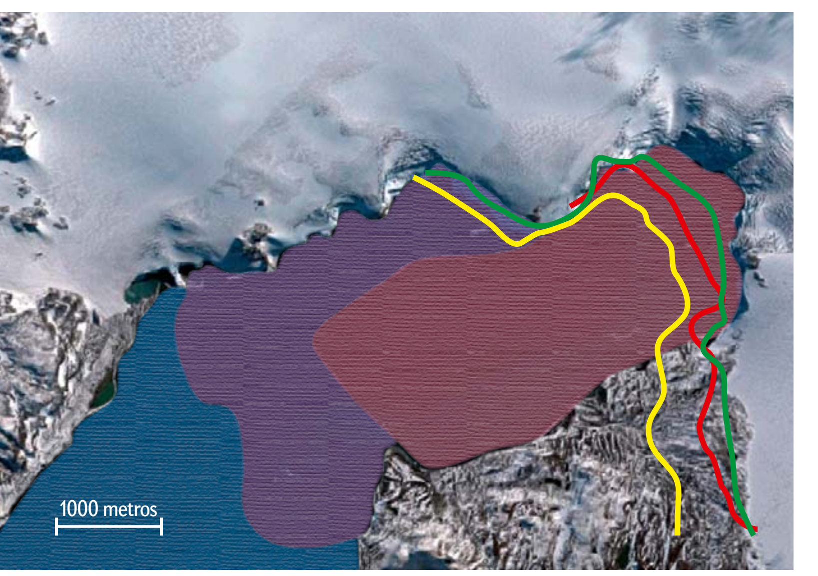
El rápido calentamiento experimentado por la península antártica en los últimos sesenta años ha sido uno de los mayores registrados en el planeta. Mientras que la temperatura media global ha aumentado unos 0,6 grados centígrados, en esa región lo ha hecho unos 2,5. Tal incremento ha alterado la criosfera (el hielo que cubre la superficie de la tierra o el agua) y ha llevado al colapso de grandes plataformas, como la de Larsen, con una extensión y una velocidad nunca antes observadas. La extensión y duración del hielo marino se han visto fuertemente reducidas, y casi el 90 por ciento de los glaciares de la península están sufriendo una retracción.

Todo ello ha repercutido en los ecosistemas antárticos. En el sistema pelágico, el krill (conjunto de crustáceos planctónicos), cuya dinámica depende del hielo marino, alterna ahora su dominancia con las salpas (organismos del zooplancton gelatinoso), que proliferan cuando la extensión del hielo se reduce. Y los pequeños flagelados se han vuelto más abundantes que las diatomeas en el fitoplancton. Estas alteraciones pueden propagarse a lo largo de la cadena trófica y alcanzar los organismos de niveles superiores, como pingüinos y focas. A pesar de tales variaciones, hasta ahora casi no se habían registrado respuestas en los organismos del bentos, que habitan el fondo marino.

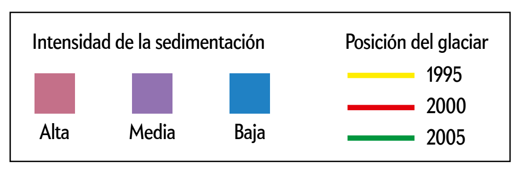
Un estudio reciente llevado a cabo por nuestro grupo ha revelado un cambio repentino, sucedido en tan solo unos pocos años, en las comunidades bentónicas de una zona de la península antártica. Hemos relacionado esa alteración con el incremento de los sedimentos depositados en la zona a causa de la retracción de los glaciares y, en última instancia, con el ascenso de la temperatura registrado en la península antártica en el último siglo.

Cambios bruscos en un medio estable

El bentos antártico se caracteriza por una alta diversidad, equiparable a la de áreas templadas e incluso tropicales. En él suelen predominar los filtradores epibentónicos sésiles (animales que viven fijos en el fondo y se alimentan filtrando partículas del agua), como esponjas, corales blandos, briozoos y ascidias. Estos organismos generan una compleja estructura tridimensional incluso sobre los fondos blandos, una característica peculiar de los sistemas antárticos, ya que en otras latitudes suelen restringirse a los fondos rocosos y los arrecifes.







EN LA CALETA POTTER se ha estudiado el bentos desde el año 1994. Desde entonces se ha observado un retroceso notable del glaciar (*izquierda*, *líneas de distintos colores*), lo que ha provocado un mayor aporte de sedimentos en el fondo marino, especialmente en la zona más interna de las tres áreas de sedimentación que se han descrito en la caleta. En esa zona, los organismos bentónicos filtradores que viven fijos en los fondos blandos ven especialmente alteradas su alimentación y respiración (*derecha*).

El ecosistema bentónico presenta además una elevada estabilidad, con lentos procesos biológicos en sus diferentes niveles de organización. Así, la mayoría de las especies exhiben una baja tasa metabólica, un crecimiento pausado y un recambio poblacional reducido. Ello determina que las comunidades muestren lentos procesos de colonización, sucesión y recuperación ante las perturbaciones. Estas características hacen del bentos un buen testigo de las alteraciones ambientales, en particular del acelerado cambio climático. Cualquier alteración en este ecosistema a causa de las variaciones ambientales, como una pérdida de biomasa, una disminución de la diversidad o un cambio en la estructura, tardará en recuperarse y será más fácil de detectar. Pero, a pesar de que se habían generado numerosas predicciones sobre los efectos del cambio climático sobre el bentos, faltaban registros que lo demostraran. Uno de los mayores obstáculos para detectarlos radica en la carencia de datos de referencia con los que puedan contrastarse los datos actuales. Ello se debe a la dificultad que comporta trabajar en el ecosistema bentónico, un hecho que se hace especialmente patente en la Antártida.

La caleta Potter, en las islas Shetland del Sur, cuenta con las ventajas que ofrecen una base (la base argentina Carlini y el laboratorio argentino-alemán Dallmann), un programa de monitorización permanente a largo plazo y un programa de cooperación internacional e interdisciplinario. Gracias a ello, nuestro grupo pudo registrar en esta zona una clara modificación de la estructura y composición de las comunidades bentónicas que se atribuyó al cambio climático.

El ecosistema bentónico de la caleta Potter presenta tres zonas bien diferenciadas y con un claro patrón de zonación vertical en ellas. El área más interna de la caleta tiene una zona con sustratos blandos que se halla dominada por bivalvos y pennatuláceos en zonas someras, y por ascidias y otros filtradores sésiles a mayores profundidades. En una segunda área en el interior de la caleta, los fondos están constituidos por depósitos de morena y sedimento; allí dominan macroalgas en las zonas someras y, a mayor profundidad, una comunidad animal similar a la de sustratos blandos. Por último, en el área externa y sobre sustratos duros proliferan macroalgas a baja profundidad y ascidias a mayor profundidad. En el conjunto de la caleta, la diversidad biológica aumenta con la profundidad y es mayor en el área interna de sustratos blandos.

Tal era la estructura que se describió cuando comenzamos los trabajos en la caleta en 1994. Sin embargo, cuatro años más tarde observamos un cambio brusco en el área interna de fondos blandos. Las ascidias prácticamente habían desaparecido, mientras que los bivalvos y los pennatuláceos habían aumentado su abundancia y habían extendido su distribución; también habían proliferado los depredadores, los detritívoros y los carroñeros. De esta manera, una comunidad antes caracterizada por la dominancia de filtradores sésiles, sobre todo ascidias, se había transformado en otra mixta dominada por organismos de diferentes grupos funcionales.

Interpretación de los hechos

Comenzó así un largo camino para intentar explicar y entender lo que estaba pasando. Nos dimos cuenta de que el área de fondos blandos era la que había recibido una mayor cantidad de sedimentos en ese período y también la que mostraba cambios más notables en el bentos. Sin embargo, no era fácil pensar que un área normalmente sujeta a una elevada sedimentación fuera afectada de tal modo. ¿Por qué, de pronto, los sedimentos habrían pasado a ser un problema para especies que ya habitaban en esas condiciones? En ese momento no resultaban evidentes factores asociados al cambio climático, como el aumento de temperatura del agua o el retroceso del glaciar, que pudieran explicar el fenómeno.

Se emprendió entonces un programa interdisciplinar para abordar el problema. El trabajo experimental analizó el efecto de diferentes factores, entre ellos la tolerancia a la sedimentación, sobre las especies que habían aumentado o disminuido. Los glaciólogos aportaron datos de que se había producido una importante retracción glaciar mientras que el estudio de las tasas de sedimentación histórica reveló un pico máximo, el mayor en el último siglo, entre 1994 y 1998, y luego un descenso. Además, los datos confirmaron el cambio climático que estaba experimentando la Antártida, especialmente en la península antártica.

Todo ello nos permitió poner en contexto aquello que tanto nos había sorprendido. Los resultados apuntan a que el aumento de temperatura afecta a los glaciares, y estos, al retroceder, aportan una gran cantidad de material inorgánico a las áreas costeras cercanas. Este material perjudica particularmente a los organismos filtradores, ya que dificulta no solo su alimentación, sino también en algunos casos su respiración, lo que lleva finalmente a una seria reducción de sus poblaciones.

El presente trabajo ha permitido detectar por primera vez un cambio brusco en la comunidad bentónica no causado por eventos catastróficos, como el impacto de témpanos o el colapso de grandes barreras. La rapidez del fenómeno hace pensar, además, en la posible existencia de valores umbrales para ciertos factores ambientales, como la sedimentación o el ascenso de la temperatura. Ello significaría que la intensificación de esos factores sería absorbida por el sistema sin alteraciones importantes, pero, una vez rebasados ciertos valores críticos, se desencadenarían cambios repentinos que llevarían al sistema a un estado del que no se podría recuperar. Teniendo en cuenta que el 90 por ciento de los glaciares de la península antártica se hallan en retroceso y que sus fiordos son centros de alta diversidad dominados por filtradores sésiles, el actual proceso de cambio climático marcaría un claro riesgo para los ecosistemas bentónicos.

—Ricardo Sahade
Instituto de Diversidad y Ecología Animal
Universidad Nacional de Córdoba
Argentina

PARA SABER MÁS

A unique assemblage of epibenthic sessile suspension feeders with archaic features in the high-Antarctic. Josep M.ª Gili et al. en *Deep-Sea Research II*, vol. 53, págs. 1029-1052, abril de 2006.

How do polar marine ecosystems respond to rapid climate change? O. Schofield et al. en *Science*, vol. 328, págs. 1520-1523, junio de 2010.

Climate change and glacier retreat drive shifts in an Antarctic benthic ecosystem. Ricardo Sahade et al. en *Science Advances*, vol. 1, n.º 10, e1500050, noviembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La vida en los fondos antárticos. Josep M.ª Gili et al. en *IyC*, noviembre de 2000.

La fusión de la Antártida en directo. Douglas Fox en *IyC*, septiembre de 2012.

BIOLOGÍA CELULAR

División celular asimétrica en el desarrollo animal

El análisis de la división de ciertas células de la mosca del vinagre ha permitido describir el modo en que se reparten las moléculas que determinarán el destino de las células hijas

CAYETANO GONZÁLEZ

Un aspecto esencial del desarrollo de los organismos multicelulares es la generación de múltiples y muy variados tipos de células a partir de una sola. En ciertos casos, ello se consigue mediante divisiones celulares asimétricas, llamadas así porque las dos células hijas resultantes reciben diferentes combinaciones de factores de destino celular, las moléculas que determinan el tipo de célula en el que cada una de ellas se convertirá. A lo largo de la evolución se han seleccionado diferentes estrategias para lograr ese objetivo. Entre ellas se halla la observada en las células que originan los órganos sensoriales de la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster*. Cuando una de ellas se divide, genera dos células hijas denominadas pIIa y pIIb, de las cuales solo la primera recibe una abundante cantidad de un tipo de vesículas llamadas endosomas Sara que están cargadas de factores de destino celular. Lo sorprendente de este caso es que, durante la mayor parte del proceso de división, las vesículas en cuestión se distribuyen homogéneamente en el centro de la célula y parece que acabarán distribuidas por igual entre las dos células hijas. Pero justo antes de que la célula se parta en dos, estas vesículas se concentran con rapidez en un lado y al final terminan en una de las células hijas. Recientemente, el grupo de investigación liderado por Marcos González Gaitán, de la Universidad de Ginebra, ha revelado con gran detalle el funcionamiento de este proceso fundamental para el desarrollo, que parece depender de una decisión tomada en el último momento.

La división en imágenes de vídeo

La primera parte de ese trabajo consistió en filmar la división de miles de células precursoras de los órganos sensoriales previamente genomodificadas para que las diferentes estructuras celulares fueran fluorescentes y visibles bajo el microscopio. Después, se diseñó la estrategia apropiada para interpretar la enorme cantidad de datos contenidos en estos vídeos, lo que supuso una tarea ingente por diferentes motivos. Para empezar, tanto la velocidad de los procesos celulares de interés como el tamaño de las estructuras celulares implicadas están muy cerca de los límites de resolución temporal y espacial de las técnicas actuales de microscopía avanzada. A esto hay que añadir que la relación entre señal y ruido rara vez es óptima en este tipo de muestras. Además, hay que considerar que incluso dentro de un mismo tipo celular hay variaciones notables de tamaño, forma y orientación y que, en general, los procesos biológicos están sujetos a fluctuaciones aleatorias que dificultan su interpretación. Todas estas circunstancias hacen que resulte prácticamente imposible deducir las claves de la división asimétrica a partir del estudio de cada uno de los vídeos obtenidos, aunque sean millares.

El éxito de Derivery (el primer firmante del trabajo) y sus colaboradores se debió a que dieron con una solución elegante y eficaz a este problema utilizando como referencia espacial y temporal el anillo de constricción que corta la célula en dos. Mediante técnicas matemáticas de procesamiento de imágenes, desplazaron la posición de cada una de las células filmadas en cada vídeo hasta hacer coincidir el anillo de todas ellas con el centro de la imagen, con lo que lograron alinearlas en el espacio. De manera similar, al hacer coincidir el momento preciso en el que empieza a constreñirse el anillo en cada célula, sincronizaron todos los vídeos. El paso final consistió en sobreimprimir uno tras otro los vídeos previamente alineados y sincronizados para obtener una sola película de lo que podríamos llamar la célula «media» que origina los órganos sensoriales. Ciertamente, tal célula es una pura creación matemática que no existe en la naturaleza; pero no es menos cierto que contiene abundante información sobre el comportamiento «medio» de los componentes celulares de interés.

Ecuación de la coreografía celular

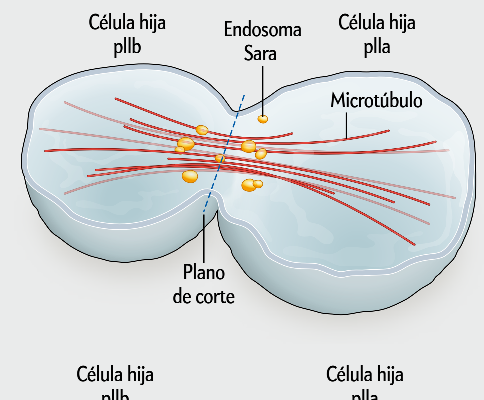
Analizando la división de esa célula «media», los autores lograron generar representaciones gráficas que revelaron dos fases en el movimiento de las vesículas Sara. La primera ocupa la mayor parte del tiempo que tarda la célula en dividirse. En ella, las vesículas se distribuyen de manera homogénea en el centro de la célula, desplazándose en ambas direcciones, a velocidad constante, a lo largo de los microtúbulos del llamado huso mitótico central, una estructura estrechamente relacionada con el anillo de constricción y localizada en el centro de la célula. La segunda fase comienza poco antes de que el anillo se cierre por completo y parta la célula en dos. En esta fase, la densidad de microtúbulos en el lado de la célula que formará la célula hija pIIa se reduce un 20 por ciento. Este hecho provoca que los endosomas Sara permanezcan el doble de tiempo en ese lado, muchos de los cuales quedarán descolgados de los microtúbulos sobre los que se desplazaban y se acumularán en ese lado de la célula. Como consecuencia, más del 80 por ciento de los endosomas Sara irá a parar a la hija pIIa.

Al combinar los análisis genéticos y bioquímicos, el grupo de González Gaitán demostró que el comportamiento de los endosomas Sara está controlado por solo tres proteínas: Klp98A, Patronin y Klp10A. La primera, Klp98A (relacionada evolutivamente con una proteína de los mamíferos conocida por su capacidad para transportar cargas a lo largo de los microtúbulos), hace mantener los endosomas Sara en constante movimiento. La segunda, Patronin, se une a un extremo de los microtúbulos para evitar la acción desestabilizadora de proteínas como la tercera, Klp10A, que acorta los microtúbulos desprotegidos. El punto crítico en este proceso radica en la acumulación de la proteína Patronin en el lado pIIb, lo cual aumenta la estabilidad de los microtúbulos en ese lado y genera una menor densidad relativa de microtúbulos en el lado pIIa, donde acaban concentrándose la mayoría de los endosomas.

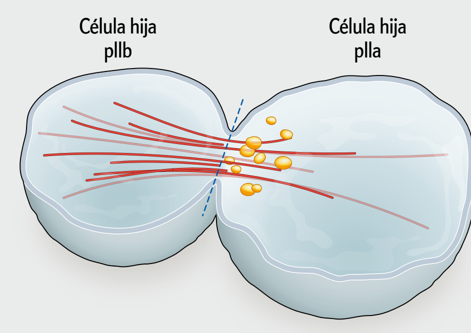
Lo realmente sorprendente es que esta compleja coreografía de componentes celulares se pueda representar con una sencilla ecuación matemática. Según esta, la asimetría en la distribución de endosomas a ambos lados de la célula es inversamente proporcional a la asimetría en la densidad de microtúbulos

DISTRIBUCIÓN DESIGUAL DE VESÍCULAS

Durante la división de una célula madre, se produce una repartición asimétrica de las moléculas que determinarán el destino final de las células hijas. En las células precursoras de los órganos sensoriales de la mosca del vinagre, tales moléculas, contenidas en unas vesículas denominadas endosomas Sara, se distribuyen de manera diferente entre las dos células hijas (pIIa y pIIb).



Primera fase: Hacia el final de la división, una estructura compuesta de microtúbulos se ensambla en el centro de la célula y se extiende por igual hacia ambos lados del plano que cortará la célula en dos. Los endosomas se distribuyen homogéneamente sobre esta estructura, moviéndose en ambas direcciones a lo largo de los microtúbulos que la forman.



Segunda fase: Justo antes de que la célula se divida, los microtúbulos se desestabilizan de modo preferente en el lado pIIa, con lo que los endosomas pasarán más tiempo en ese lado y acabarán acumulándose en él.

elevada al producto de varios factores, entre ellos el inverso de la asimetría en la densidad de microtúbulos. El equipo de González Gaitán ha demostrado que esta ecuación es correcta para un amplio rango de valores de asimetría en la densidad de microtúbulos y, además, ha medido experimentalmente todos sus parámetros. La relación directa entre la asimetría en la distribución de las vesículas y el inverso de la asimetría en la densidad de microtúbulos explica por qué, contra lo que cabría esperar de manera intuitiva, unas vesículas que tienen afinidad por los microtúbulos acaban acumulándose donde la densidad de microtúbulos es menor. Asimismo, el hecho de que el inverso de la densidad de microtúbulos afecte de forma exponencial a la asimetría de los endosomas permite entender cómo una diferencia relativamente pequeña en la densidad de microtúbulos entre los lados pIIb y pIIa origina una distribución tan marcadamente asimétrica de las vesículas.

Comprobación de la ecuación

La prueba de fuego de la validez de esta ecuación la obtuvieron los autores en células genomodificadas para que expresaran una molécula capaz de atrapar Patronin. Diseñada para unirse al lado pIIb de la membrana celular, esta trampa molecular secuestra Patronin, con lo que la retira de su posición natural en la parte central de la célula y hace que los extremos de los microtúbulos del huso mitótico central queden desprotegidos en ese lado y sean desestabilizados por la acción de Klp10A. El resultado es una inversión en la asimetría de la densidad de microtúbulos, que en estas células modificadas es menor en el lado pIIb que en el pIIa. Tal y como predice la ecuación, esta situación da lugar a que la distribución de endosomas Sara se invierta, de manera que la mayoría de ellos acaba en la célula hija pIIb. Asimismo, como también predice la ecuación, si la trampa que secuestra Patronin se sitúa en el lado pIIa de la membrana celular, ello no altera ni la orientación de la asimetría de la densidad de microtúbulos, que sigue siendo menor en ese lado, ni el destino preferente de los endosomas Sara.

El trabajo descrito en este artículo (que además contiene información sobre una gran cantidad de ensayos in vitro, análisis del efecto de diferentes mutaciones y programas de ordenador desarrollados específicamente para analizar este tipo de datos) es un excelente ejemplo en el que los análisis cuantitativos rigurosos y la aplicación de ecuaciones matemáticas resuelven un problema complejo de biología celular que no logra explicar la pura intuición.

Teniendo en cuenta la naturaleza ubicua y el alto grado de conservación evolutiva de los componentes implicados, el mecanismo aquí descrito podría estar operativo en otras especies y tipos celulares en los que ocurra la distribución asimétrica de una carga, vesicular o de otro tipo, transportada por proteínas que se desplazan sobre un haz asimétrico de microtúbulos. Un posible caso sugerido por los propios autores, y aún por investigar, es el del tráfico de vesículas en las ramificaciones neuronales conocidas como dendritas, que es parte esencial de la recepción de estímulos nerviosos emitidos por otras neuronas. De momento, podemos afirmar que, una vez más, las investigaciones realizadas con la mosca del vinagre han permitido desvelar detalles moleculares que podrían dar pistas clave para entender el funcionamiento de procesos biológicos fundamentales en organismos superiores.

—Cayetano González
Profesor de investigación ICREA
Instituto de Investigación Biomédica
Barcelona

Artículo original publicado en *Nature* 528, págs. 196-197, 2015.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Asymmetric cell division during animal development. J. A. Knoblich en *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 2, págs. 11-20, 2001.
Patronin regulates the microtubule network by protecting microtubule minus ends. S. S. Goodwin y R. D. Vale en *Cell*, vol. 143, págs. 263-274, 2010.
Polarized endosome dynamics by spindle asymmetry during asymmetric cell division. E. Derivery et al. en *Nature*, vol. 528, págs. 280-285, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Citoquinesis en células eucariotas. Mercedes Pardo en *IyC*, julio de 2005.
Control de la división celular. Alexandre Vendrell y Manuel Mendoza en *IyC*, enero de 2011.

SISTEMAS COMPLEJOS

Las leyes matemáticas emergentes en el uso del lenguaje

Un análisis a gran escala de miles de textos digitalizados ha permitido formular el primer tratamiento estadístico riguroso de la ley de Zipf, el principio universal que gobierna la frecuencia con que utilizamos las palabras

ÁLVARO CORRAL, ISABEL MORENO SÁNCHEZ Y FRANCESC FONT CLOS

La elección cuidadosa de las palabras constituye un ingrediente básico de la buena literatura. Todo autor es completamente libre de escoger qué palabra usar en cada momento. Sin embargo, hace más de un siglo que sabemos que esa libertad no parece aplicarse a la frecuencia relativa con que los autores emplean las palabras. En cualquier texto, la proporción en que aparecen las distintas voces sigue una pauta universal conocida como ley de Zipf, así llamada en honor al lingüista estadounidense George Kingsley Zipf, fallecido en 1950. Dicha ley parece afectar por igual a todos los textos, sin importar el autor, el idioma, la calidad literaria o, incluso, si se trata de un manual de jardinería o de una de las mejores obras de la literatura de todos los tiempos.

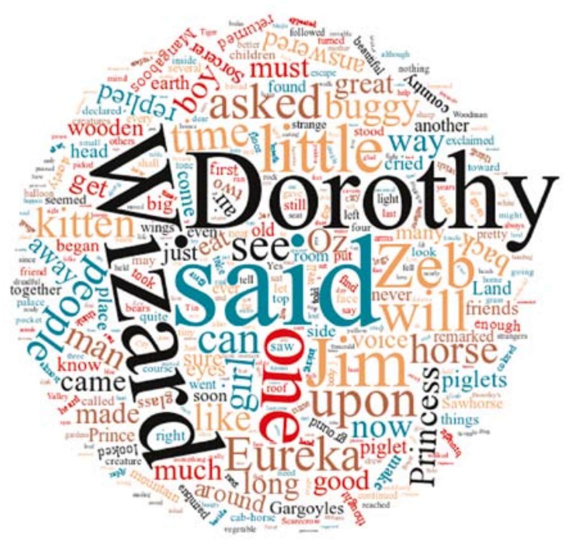
La ley de Zipf establece que la palabra más común en un texto aparecerá, aproximadamente, el doble de veces que la segunda más usada, el triple que la tercera, y así sucesivamente. Por ejemplo, en *Dorothy and the wizard in Oz*, de L. Frank Baum (1908), la palabra más frecuente es *the*, con 3137 apariciones; la segunda más común, *and*, puede leerse 1544 veces; la tercera, *to*, surge en 1107 ocasiones... y así hasta términos como *wizardries*, que aparecen una sola vez. Una curiosa consecuencia es que no existe ninguna diferencia fundamental entre las palabras comunes y las raras: la distinción parece totalmente arbitraria. Además, la ley implica que textos cada vez más largos nunca dejarán de sorprendernos con palabras nuevas. Dada su importancia al describir el uso del vocabulario, la ley de Zipf constituye el resultado primordial de la lingüística cuantitativa.

Más sorprendente aún, se ha visto que la ley de Zipf va mucho más allá de la lingüística, con aplicaciones en las ciencias humanas, la tecnología o la biología. Nueva York, por ejemplo, la ciudad más poblada de EE.UU., tiene aproximadamente el doble de habitantes que Los Ángeles, el triple que Chicago, etcétera. El mismo patrón se observa en el número de empleados de las empresas, el de fieles de las distintas religiones y sectas, el de enlaces o visitas que recibe cada página en Internet o el número de copias de cada proteína presentes en una célula.

Sin embargo, y a pesar de su aparente ubicuidad, la ley de Zipf adolece de dos grandes defectos. Primero, su carácter parece más cualitativo que cuantitativo: ¿qué quiere decir que la palabra más común aparecerá «aproximadamente» el doble de veces que la siguiente? ¿Hasta dónde se puede estirar la aproximación? Y segundo, en el caso de la lingüística, hasta ahora la ley no había sido contrastada con un número suficientemente grande de textos, por lo que su apoyo empírico podía considerarse más anecdótico que riguroso.

En un trabajo reciente, impulsado por la Obra Social «la Caixa», los autores de este artículo nos propusimos dotar a la ley de Zipf de un contenido matemático preciso y situarla en la nueva era de los macrodatos, o *Big Data*. Para ello recurrimos a un gran corpus de obras en lengua





RAZONES LINGÜÍSTICAS: Las diferentes palabras que aparecen en un texto lo hacen manteniendo proporciones bien definidas. Estas imágenes, donde el tamaño de la fuente es proporcional al número de apariciones, ilustran el resultado para la obra *Dorothy and the wizard in Oz* (L. Frank Baum, 1908). La ilustración superior muestra las palabras más frecuentes; en la inferior se han eliminado las palabras vacías. Gracias al análisis estadístico de miles de textos, un estudio reciente ha obtenido una formulación matemática más precisa de este enigmático fenómeno, conocido como ley de Zipf.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

inglesa y estudiamos la aplicabilidad de varias versiones no equivalentes de la ley de Zipf. Como resultado, hemos encontrado que una de ellas reproduce con gran acierto las pautas observadas en miles de textos: un hallazgo que podría allanar el camino hacia la comprensión de esta misteriosa ley.

Más de 30.000 obras

Para nuestro trabajo, comenzamos descargando todas las obras en inglés existentes en la web del Proyecto Gutenberg, un importante repositorio de libros electrónicos gratuitos que actualmente supera los 30.000 volúmenes. Después tuvimos que encontrar una formulación de la ley más clara desde el punto de vista probabilístico: una que no asociara probabilidades con palabras, sino con variables numéricas.

La solución era ya conocida por el propio Zipf: si, una vez que hemos contado el número de apariciones de cada palabra, hacemos una segunda estadística que refleje cuántas palabras diferentes aparecen un número dado de veces, obtendremos una ley equivalente. En concreto, el número de palabras que solo aparecen una vez es el cuádruplo (2^2) del número de palabras que aparecen dos veces, el nónuplo (3^2) del número de palabras que aparecen tres veces, y así sucesivamente. En estos casos resulta conveniente añadir a la ley un parámetro libre a fin de dotarla de mayor flexibilidad. De esta manera, postulamos que el número de palabras que aparecen una vez es un factor $2^{2\delta}$ de las que aparecen dos veces, $3^{2\delta}$ de las que aparecen 3 veces, etcétera, con la suposición de que el parámetro δ tomará valores cercanos a 1.

Aunque tradicionalmente ha sido común considerar estas dos representaciones de la ley de Zipf como equivalentes, un tratamiento matemático riguroso muestra que dicha equivalencia solo se daría si la frecuencia de las palabras fuese una variable continua. Sin embargo, está claro que esta únicamente puede tomar valores discretos (enteros). A partir de aquí, puede verse de inmediato que la ley de Zipf adolece de una ambigüedad en su definición, pues su formulación precisa depende de cómo elijamos representarla. Ante esta situación, la mejor opción es dejar hablar a los datos y que sean estos los que escojan la forma óptima de la ley.

Mediante la aplicación de técnicas estadísticas bien conocidas, como la estimación por máxima verosimilitud (o por mínima inverosimilitud, como nosotros preferimos llamarla) y los tests de bondad de ajuste, pueden compararse las diferentes opciones de manera cuantitativa. Gracias a ello hemos podido comprobar que cierta versión un tanto elaborada de la ley de Zipf, deducida en los años sesenta por Benoît Mandelbrot, el padre de los fractales, funciona realmente mal. En concreto, vimos que la versión de Mandelbrot era rechazada en el 99 por ciento de los libros (con un nivel de confianza del 95 por ciento).

Sin embargo, otra versión mucho más simple de la ley, consistente en una sencilla ley de potencias para la distribución acumulada, daba cuenta del uso del vocabulario en el 40 por ciento de los textos (de igual modo, con un nivel de confianza del 95 por ciento). En nuestra opinión, resulta más que sorprendente que una ley tan sencilla y con un solo parámetro libre logre describir el vocabulario de una cantidad tan ingente de obras. (Por ejemplo, la célebre campana de Gauss, aplicable en situaciones completamente distintas, requiere siempre dos parámetros: la posición del centro de la campana y su anchura.)

Además, los tests estadísticos son particularmente estrictos para las palabras menos comunes: si la proporción entre el número de palabras que aparecen una y dos veces se desvía ligeramente de lo predicho por la ley, el ajuste es rechazado. De hecho, si modelizamos de manera independiente el comportamiento de las palabras que solo aparecen una o dos veces, el ámbito de aplicabilidad aumenta de forma drástica.

Origen incierto

Nuestros resultados son válidos para textos en inglés, la lengua abrumadoramente mayoritaria en Internet y, en particular, en el Proyecto Gutenberg. Sin embargo, es posible que para el castellano las conclusiones fuesen diferentes. Ello se debe a que las sutilezas de la ley de Zipf se manifiestan para las palabras menos comunes (donde dejan de resultar válidas las aproximaciones continuas y salen a la luz los efectos discretos), las cuales abundan más en castellano que en inglés debido a la mayor riqueza morfológica del primero. Por desgracia, son pocas las obras electrónicas escritas en castellano a las que puede accederse con facilidad, lo que por el momento nos impide comprobar esta hipótesis.

No podemos concluir sin preguntarnos sobre el origen de esta misteriosa ley. Aunque la cuestión ha sido objeto de un encendido debate desde hace más de medio siglo, por ahora nadie dispone de una respuesta clara. En los años cincuenta, el célebre psicólogo estadounidense George Miller criticó la relevancia cognitiva de la ley de Zipf, ya que, aparentemente, esta también podía explicarse como la acción de un mono aporreando las teclas de una máquina de escribir. Sin embargo, está claro que el lenguaje humano no procede de ese modo. Hacia la misma época, Herbert Simon, quien más tarde sería galardonado con el premio Nobel de economía, situó el origen de la ley en el mismo efecto por el que los ricos se hacen cada vez más ricos («el dinero llama al dinero»): así, cuanto más aparece una palabra en un texto, su «tasa de crecimiento» aumentaría. Tal vez este modelo pueda explicar cualitativamente el desarrollo de las ciudades o el de las empresas, pero su aplicabilidad al lenguaje resulta cuestionable. Otras explicaciones basadas en la teoría de la información también han sido criticadas.

A falta de modelos aceptados por una mayoría, por el momento habremos de conformarnos con los incontrovertibles datos empíricos. En este sentido, creemos que nuestro análisis puede constituir un novedoso paso adelante hacia la comprensión de esta enigmática y ubicua ley.

—Álvaro Corral,
Isabel Moreno Sánchez
y Francesc Font Clos
Centro de Investigación Matemática
y Universidad Autónoma de Barcelona

PARA SABER MÁS

Confronting the mistery of urban hierarchy. Paul Krugman en *Journal of the Japanese and International Economies*, vol. 10, n.º 4, págs. 399-418, 1996.

Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. Mark E. J. Newman en *Contemporary Physics*, vol. 46, n.º 5, págs. 323-351, 2005.

Large-scale analysis of Zipf's law in English texts. Isabel Moreno Sánchez, Francesc Font Clos y Álvaro Corral en *PLoS ONE*, vol. 11, e0147073, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Números y palabras. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, febrero de 2003.

Más sobre números y palabras. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, marzo de 2003.

Lenguaje, redes y evolución. Ricard V. Solé, Bernat Corominas Murtra y Jordi Fortuny en *IyC*, mayo de 2013.



SISTEMA SOLAR

NACIDO DEL



Nuevas pruebas indican que las primeras etapas del sistema solar estuvieron marcadas por planetas errantes y violentos episodios de destrucción interplanetaria

Konstantin Batygin, Gregory Laughlin y Alessandro Morbidelli

LA HISTORIA DEL NACIMIENTO DE NUESTRO sistema solar está desgastada de tanto contarla. Comienza hace miles de millones de años, con una nube negra de gas y polvo que gira lentamente. La nube colapsa sobre sí misma y, en su centro, se forma el Sol. Con el tiempo, a partir de los restos de gas y de los escombros que se arremolinan alrededor de nuestra estrella, surgen sus ocho planetas y otros mundos menores, como Plutón. Nuestro sistema planetario lleva desde entonces rotando alrededor de sí mismo a través del espacio, con movimientos tan precisos y predecibles como los de un reloj.

Konstantin Batygin es profesor de ciencias planetarias en el Instituto de Tecnología de California. Investiga la formación y la evolución dinámica de los sistemas planetarios.

Gregory Laughlin es catedrático de astronomía y astrofísica en la Universidad de California en Santa Cruz. Su investigación se centra en la detección y caracterización de exoplanetas. Es autor del blog *Systemic* (www.oklo.org).

Alessandro Morbidelli es planetólogo del Observatorio de la Costa Azul, en Niza. Ha elaborado importantes modelos para describir las distintas fases de la evolución del sistema solar.

En los últimos años, los astrónomos hemos atisbado indicios sutiles que desmienten ese conocido relato. En comparación con la estructura de los miles de sistemas planetarios descubiertos en los últimos años, las características más notables del sistema solar —sus mundos rocosos interiores, sus gigantes gaseosos exteriores y la ausencia de planetas entre Mercurio y el Sol— se antojan, en realidad, bastante anómalas. Al revertir el tiempo en las simulaciones por ordenador, estamos descubriendo que estas peculiaridades se deben a una juventud conflictiva. La nueva versión de la historia del sistema solar incluye mucho más drama y caos de lo que la mayoría habría imaginado.

Una nueva crónica habla de planetas errantes expulsados de sus lugares de nacimiento, de mundos perdidos que hace eones fueron arrastrados a una abrasadora destrucción en el Sol, y de gigantes solitarios arrojados a las frías profundidades del espacio interestelar cercano. Mediante el estudio de estos acontecimientos remotos y de las huellas que podrían haber dejado (tales como el Planeta Nueve, un hipotético objeto propuesto recientemente que quizá se esconda más allá de Plutón), estamos definiendo una imagen coherente tanto de los orígenes del sistema solar como de su contexto cósmico.

EL SISTEMA SOLAR CLÁSICO

Los planetas constituyen un subproducto de la formación estelar. Esta se produce en el seno de enormes nubes moleculares con masas de hasta 10.000 veces la del Sol. Algunas de las regiones centrales más densas pueden acabar aglomerándose sobre sí mismas, en un proceso que engendra una brillante protoestrella central rodeada por un anillo de gas y polvo, extenso y opaco, que recibe el nombre de disco protoplanetario.

Durante décadas, los teóricos han recurrido al disco protoplanetario del Sol para explicar una de las características más distintivas de nuestro sistema solar: una prole dividida espacialmente en planetas rocosos y gaseosos. Hay cuatro mundos rocosos confinados entre la órbita de Mercurio, con un período de 88 días, y la de Marte, de 687 días. En cambio, los planetas gigantes y ricos en gas ocupan órbitas mucho más lejanas, con períodos de entre 12 y 165 años, y su masa conjunta supera en más de 150 veces a la de los planetas terrestres.

Se cree que ambos tipos de planetas se gestaron a partir de un proceso universal: las partículas de polvo que giraban en el turbulento disco fueron chocando y uniéndose unas con otras hasta formar planetesimales, objetos con un tamaño característico del orden del kilómetro; algo parecido a la manera en que las corrientes de aire y las fuerzas electrostáticas forman bolas de polvo en el suelo sin barrer de una cocina. Los planetesimales más grandes ejercían una mayor atracción gravitatoria, por lo que siguieron atrapando los restos que poblaban sus órbitas. En torno a un millón de años después del colapso de la nube, el disco protoplanetario del sistema solar —como cualquier otro del universo— estaba repleto de embriones planetarios del tamaño de la Luna.

El germen de mayor tamaño se encontraba pasado el actual cinturón de asteroides, en una región lo suficientemente alejada del calor del Sol recién nacido para que hubiese hielo. Más allá de esta «línea de hielo» (o «línea de congelación») había abundante hielo con el que formar planetas, de modo que los embriones podían darse un festín y crecer hasta tamaños enormes. Y, en un clásico ejemplo del lema «los ricos se hacen cada vez más ricos», el embrión de mayor tamaño fue también el que creció más de-

PÁGINAS ANTERIORES: KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

EN SÍNTESIS

Una gran cantidad de pruebas, procedentes de simulaciones por ordenador y de observaciones de otros planetas en la Vía Láctea, están revelando nuevos detalles sobre la dinámica y violenta historia de nuestro sistema solar.

La configuración del sistema solar, con pequeños mundos rocosos interiores y gigantes gaseosos en el exterior, es anómala en comparación con la de otros sistemas planetarios, la mayoría de los cuales presentan estructuras muy diferentes.

La mejor explicación para la peculiar arquitectura del sistema solar es que los planetas gigantes sufrieron una prolongada serie de migraciones orbitales e inestabilidades dinámicas hace miles de millones de años.

Esos sucesos tumultuosos podrían haber arrojado planetas enteros al Sol o al espacio interestelar y haber sido cruciales para los orígenes y la evolución temprana de la vida en la Tierra.

prisa, ya que su intenso campo gravitatorio atrajo muy pronto la mayor parte del hielo, gas y polvo de sus alrededores. En solo un millón de años, el voraz embrión había aumentado de tamaño hasta convertirse en Júpiter. Este —creían los teóricos— fue el momento crucial en el que surgió la división entre los planetas del sistema solar. Rezagados con respecto a Júpiter, los demás planetas gigantes alcanzaron tamaños menores porque crecieron más despacio: solo intensificaron su tirón gravitatorio sobre el gas una vez que Júpiter hubo reducido la cantidad disponible. Y los mundos interiores eran mucho más pequeños aún, ya que nacieron dentro de la línea de congelación, donde, en comparación, el disco era pobre en hielo y gas.

Salvo por unos pocos detalles fastidiosos —como las masas excesivamente pequeñas de Marte y Mercurio—, este relato, basado en ese principio de «primero Júpiter», parecía explicar de manera satisfactoria la estructura del sistema solar. Por tanto, estaba claro lo que cabía esperar de los sistemas planetarios en torno a otras estrellas: planetas gigantes y con períodos largos más allá de la línea de congelación, y mundos rocosos con períodos de pocos años o menos al otro lado. Tales ideas, sin embargo, resultaron ser engañosas.

LA REVOLUCIÓN DE LOS EXOPLANETAS

Cuando, hace más de veinte años, comenzaron a descubrirse los primeros exoplanetas, la teoría de la formación del sistema solar fue puesta a prueba a escalas galácticas. Muchos de los primeros exoplanetas que se encontraron eran «jupíteres calientes», gigantes gaseosos que giraban a toda velocidad muy cerca de sus estrellas, con períodos orbitales de apenas unos días. La existencia de planetas gigantes tan próximos a la ardiente superficie de una estrella, en zonas donde no hay ni rastro de hielo, contradecía por completo las ideas clásicas sobre formación planetaria. Para explicar el fenómeno, los teóricos concluyeron que tales objetos se habían formado más lejos y que, luego, migraron hacia el interior de algún modo.

Sin embargo, teniendo en cuenta las propiedades de los miles de exoplanetas descubiertos desde entonces por misiones como Kepler, de la NASA, los expertos están empezando a llegar a la incómoda conclusión de que los sistemas parecidos al nuestro son bastante excepcionales. El sistema planetario típico parece contener una o más supertierras (planetas unas pocas veces mayores que la Tierra) con períodos orbitales inferiores a los cien días. En cambio, los planetas gigantes (análogos a Júpiter y Saturno) solo se han avistado en aproximadamente el 10 por ciento de las estrellas, y solo una pequeña parte de ellos describen órbitas tranquilas y más o menos circulares.

Al ver arruinadas sus expectativas, los teóricos comprendieron que aquellos pocos «detalles fastidiosos» de la teoría clásica de la formación del sistema solar exigían mejores explicaciones. ¿Por qué hay tan poca masa en la región interior de nuestro sistema planetario, con planetas rocosos más bien pequeños en lugar de supertierras, y sin ningún mundo más allá de la órbita de 88 días de Mercurio? ¿Y por qué las órbitas de los planetas gigantes del Sol son tan tranquilas y están tan esparcidas?

Según parece, la respuesta a estas preguntas debe retrotraerse a la incapacidad de la teoría clásica para dar cuenta de la fluida mutabilidad de los discos protoplanetarios. Y es que, al igual que una barca en mitad del océano, un planeta recién nacido puede ir a la deriva y acabar muy lejos de su lugar de origen. Cuando un planeta ha crecido lo suficiente, su influencia gravitatoria se propaga a través del disco circundante y produce ondas de densidad en forma de espiral. Estas ondas ejercen una fuerza gravitatoria propia, lo que genera potentes retroalimentaciones positivas y negativas entre los planetas y el disco. De esta manera, pueden surgir intercambios irreversibles de momento y energía que permitan a los planetas recién formados emprender épicos viajes a través de los discos donde nacieron.

Cuando se tiene en cuenta la migración planetaria, las líneas de congelación de los discos dejan de desempeñar un papel relevante en la conformación de los sistemas planetarios. Por ejemplo, planetas gigantes nacidos más allá de la línea de hielo pueden convertirse en jupíteres calientes si se desplazan hacia el interior, viajando junto al gas y el polvo que caen en espiral hacia la estrella.

Miles de exoplanetas están llevando a los astrónomos a la incómoda conclusión de que no hay muchos sistemas planetarios que se parezcan al nuestro

El problema, sin embargo, es que este proceso funciona casi demasiado bien; de hecho, parece tener lugar en todos los discos protoplanetarios. Así pues, ¿cómo explicar que las órbitas de Júpiter y Saturno estén tan alejadas del Sol?

LA GRAN VIRADA

El primer indicio de una explicación convincente llegó en 2001, gracias a las simulaciones por ordenador de Frederic Masset y Mark Snellgrove, por entonces en la Universidad Queen Mary de Londres. Estos investigadores modelizaron la evolución simultánea de las órbitas de Saturno y Júpiter en el disco protoplanetario del Sol. Debido a la menor masa de Saturno, su migración hacia el interior es más rápida que la de Júpiter, y los dos planetas se van acercando el uno al otro a medida que transcurre su desplazamiento. Con el tiempo, las órbitas alcanzan una determinada configuración conocida como resonancia de movimiento medio, en la que Júpiter da tres vueltas alrededor del Sol por cada dos de Saturno.

Dos planetas unidos por una resonancia de movimiento medio pueden ir transfiriéndose momento y energía de uno a otro, como en una versión interplanetaria del juego de la patata caliente. Debido a la naturaleza coherente de las perturbaciones resonantes, ambos mundos ejercen una influencia gravitatoria común y amplificada sobre cada uno de ellos y sobre el entorno. En el caso de Júpiter y Saturno, este tira y afloja permitió que ambos lanzaran conjuntamente su peso contra el disco protoplanetario y abrieran un gran hueco en él, con Júpiter en el lado interior y Saturno en el exterior. Llegados a este punto, la atracción gravitatoria de Júpiter sobre la parte interior del disco era —debido a su mayor masa— más intensa que la de Saturno sobre la zona exterior. En contra de lo que diría nuestra intuición, eso provocó que ambos planetas invirtieran su rumbo y comenzaran a alejarse del Sol. Esta zambullida, primero hacia

dentro y luego hacia fuera, es también conocida como «la Gran Virada», por su similitud con los movimientos de un velero que intenta cambiar el rumbo contra un viento constante.

En 2011, diez años después de que se gestara la idea de la Gran Virada, las simulaciones por ordenador de Kevin J. Walsh, por entonces en el Observatorio de la Costa Azul, en Niza, y sus colaboradores demostraron que el fenómeno no solo explicaba la historia dinámica de Júpiter y Saturno, sino también la distribución de los asteroides rocosos y helados y la reducida masa de Marte. Cuando Júpiter migró hacia el interior, su influencia gravitatoria hizo que capturara planetesimales y los condujese consigo a través del disco, arrastrándolos al modo de una máquina quitanieves. Si suponemos que, antes de dar la vuelta, Júpiter se acercó tanto al Sol como para alcanzar la órbita actual de Marte, el planeta pudo haber transportado hasta el interior del sistema solar una cantidad de bloques helados equivalente a unas diez veces la masa de la Tierra, lo que habría llevado agua y otras sustancias volátiles a dicha zona. Este proceso también habría creado un límite exterior bien definido para el material de formación planetaria del interior de la nebulosa solar, lo que habría interrumpido el crecimiento de un embrión planetario cercano que, más tarde, se convertiría en Marte.

EL GRAN ATAQUE

A pesar de lo convincente que parecía la Gran Virada en 2011, seguía sin estar clara su relación con el otro gran misterio del sistema solar: la total ausencia de planetas entre el Sol y Mercurio. En comparación con otros sistemas planetarios, repletos de supertierras cercanas a su estrella, el nuestro parece casi vaciado. ¿Por qué? Resulta extraño que la formación de planetas en torno al Sol no siguiera el mecanismo predominante que observamos en el resto del cosmos. En 2015, dos de nosotros (Batygin y Laughlin) nos planteamos qué consecuencias tendría la Gran Virada sobre una hipotética comitiva de supertierras que orbitasen cerca del Sol. Nuestra sorprendente conclusión fue que no habrían sobrevivido a ella. Es notable que este viaje de ida y vuelta de Júpiter pueda explicar tantas propiedades de los planetas que tenemos y, también, los que no tenemos.

Cuando Júpiter irrumpió en el sistema solar interior cual máquina quitanieves, las órbitas circulares y ordenadas de los planetesimales que iba encontrando en su camino debieron de convertirse en un enjambre desorganizado de trayectorias espirales y entrecruzadas. Algunos de los planetesimales chocarían con gran fuerza, rompiéndose en fragmentos que inevitablemente generarían nuevas colisiones y nuevas fragmentaciones. Por tanto, lo más probable es que la migración de Júpiter hacia el interior desencadenara una cascada de choques que diezmase la población de planetesimales, molidos hasta convertirse de nuevo en rocas, guijarros y arena.

Triturados por los choques y por la resistencia aerodinámica de los confines gaseosos del disco protoplanetario interior, los antaño planetesimales, ahora fragmentados, perdieron energía y descendieron rápidamente en espiral hacia el Sol. Mientras caían, habrían quedado atrapados con facilidad en nuevas resonancias, amontonándose de forma amenazadora en el horizonte de cualquier supertierra primordial cercana al Sol.

Aquello tuvo que haber sido una muy mala noticia para esos planetas, acosados de repente por un tropel de escombros parásitos que se alimentaban de su energía orbital. Obstaculizados constantemente por el gas que fluía a través del disco, esos enjambres de escombros tendrían que haberse precipitado en espiral hacia el Sol. Pero, debido a sus resonancias con las supertierras, permanecieron donde estaban, extrayendo energía orbital de los planetas y disipándola en forma del calor generado por la resistencia aerodinámica. El efecto neto fue que esas nubes de planetesimales erosionados causaron que los planetas cayesen en espiral hacia el Sol, y todo con una eficacia implacable: la órbita de cada mundo fue descendiendo hasta que, uno a uno, todos acabaron consumiéndose en la estrella. Nuestras simulaciones indican que ninguno de estos planetas hipotéticos pudo haber sobrevivido más de unos pocos cientos de miles de años tras el inicio de la cascada de colisiones.

Por lo tanto, la Gran Virada de Júpiter y Saturno debió de desencadenar un auténtico Gran Ataque sobre una población de planetas primordiales cercanos al Sol. Cuando estas antiguas supertierras cayeron sobre el astro, dejaron tras de sí, en la nebulosa solar, una cavidad devastada y despoblada que se extendía hasta una órbita con período de quizá 100 días. Como resultado, la fulgurante zambullida de Júpiter a través del sistema solar primitivo produjo un anillo bastante estrecho de escombros rocosos a partir de los cuales se formaron, cientos de millones de años más tarde, los planetas terrestres. La concatenación de sucesos fortuitos necesaria para que se produzca esta delicada coreografía indica que los planetas pequeños y rocosos similares a la Tierra (y tal vez la propia vida) tal vez sean poco frecuentes en el cosmos.

La Gran Virada de Júpiter y Saturno pudo desencadenar un auténtico Gran Ataque sobre una población de supertierras primordiales

EL MODELO DE NIZA

Para el tiempo en el que Júpiter y Saturno regresaban de su incursión en el sistema solar interior, el disco de gas y polvo que rodeaba al Sol estaba desapareciendo. La pareja resonante formada por Júpiter y Saturno acabó por encontrarse con los recién formados Urano y Neptuno, y puede que con otro cuerpo de tamaño similar. Ayudada por los efectos gravitatorios del gas que se disipaba, el dúo también atrapó en resonancias a esos gigantes más pequeños. Así que, mientras desaparecía la mayor parte del gas del disco, la estructura interior del sistema solar probablemente consistía en un anillo de escombros rocosos situado en las proximidades de la órbita actual de la Tierra. En sus confines exteriores, una cadena compacta y resonante de al menos cuatro planetas gigantes se alojaba en órbitas casi circulares entre la órbita actual de Júpiter y un punto más o menos a medio camino de la que hoy ocupa Neptuno. Más allá del planeta gigante más externo, los helados planetesimales del disco exterior se extendían hasta los límites del sistema solar. En el transcurso de cientos de millones de años se formaron los planetas terrestres, y los otrora salvajes mundos exteriores alcanzaron la que podría haber sido una estabilidad duradera.

Continúa en la página 27

La evolución del sistema solar

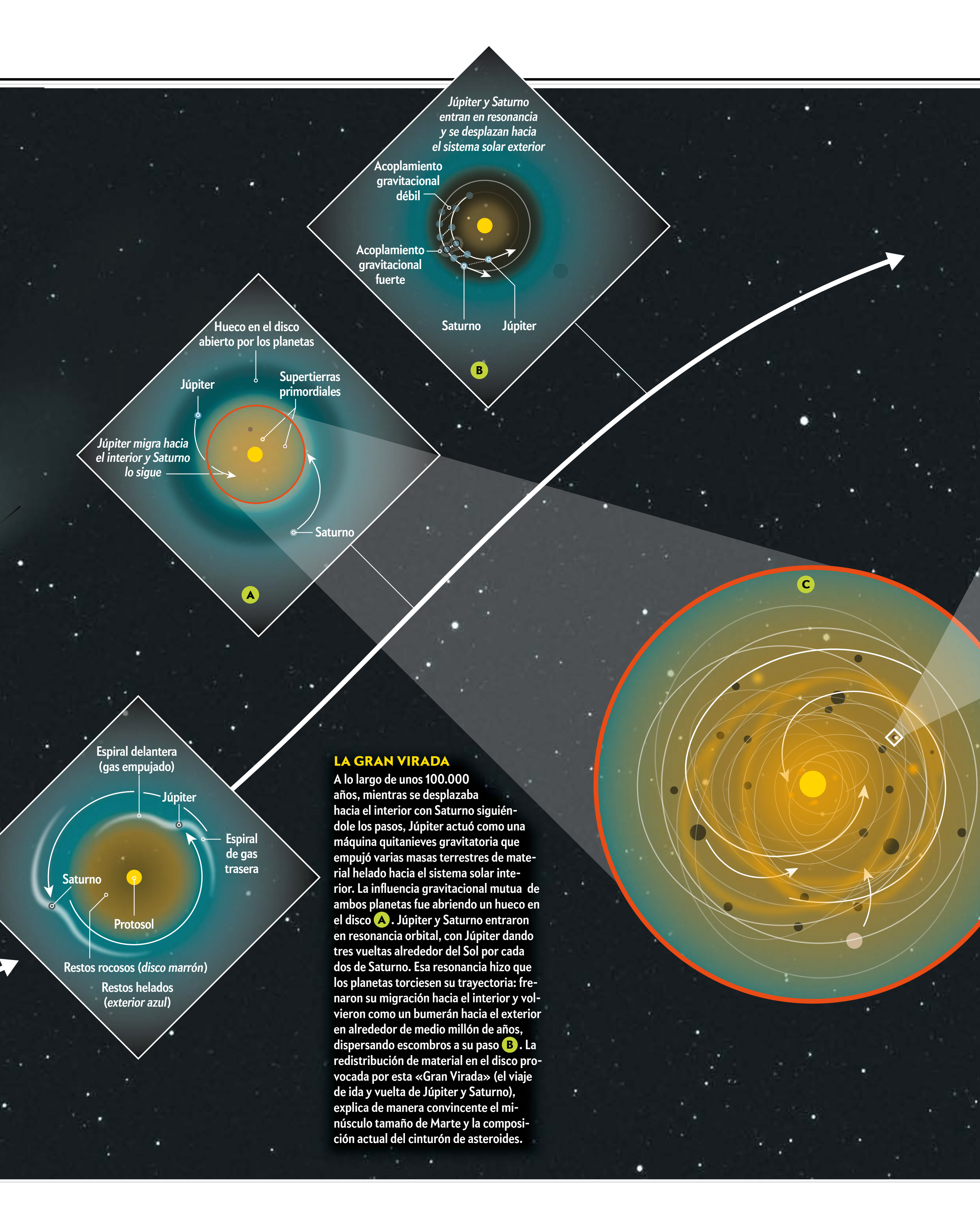
Aunque hubo un tiempo en que se consideraba la norma en el cosmos, la estructura del sistema solar, con planetas rocosos interiores y gigantes gaseosos en el exterior, lo convierte en un bicho raro. Los mundos de tamaño medio conocidos como supertierras parecen ser los planetas más comunes de nuestra galaxia, pero no hay ninguno alrededor del Sol. Mientras que su compañero más cercano es Mercurio, la mayoría de las estrellas tienen planetas mucho más próximos. Además, las órbitas de los planetas del sistema solar tienden a ser más vastas y circulares que las de aquellos que giran alrededor de otras estrellas. Tales anomalías podrían deberse a complejas interacciones planetarias durante la juventud del sistema solar.

Vía Láctea
Nube molecular gigante
Colapso de un núcleo
Proto-Júpiter
Núcleo como Neptuno
Gas de acreción
Disco exterior (residuos helados)
Supertierra
Material que cae
Protosol
Disco de gas y polvo
Planetesimales en crecimiento
Disco interior (residuos rocosos)
Campo magnético
Chorro
Protosol rotando sobre sí mismo
Acreción sobre la estrella

EL NACIMIENTO DE LOS PLANETAS

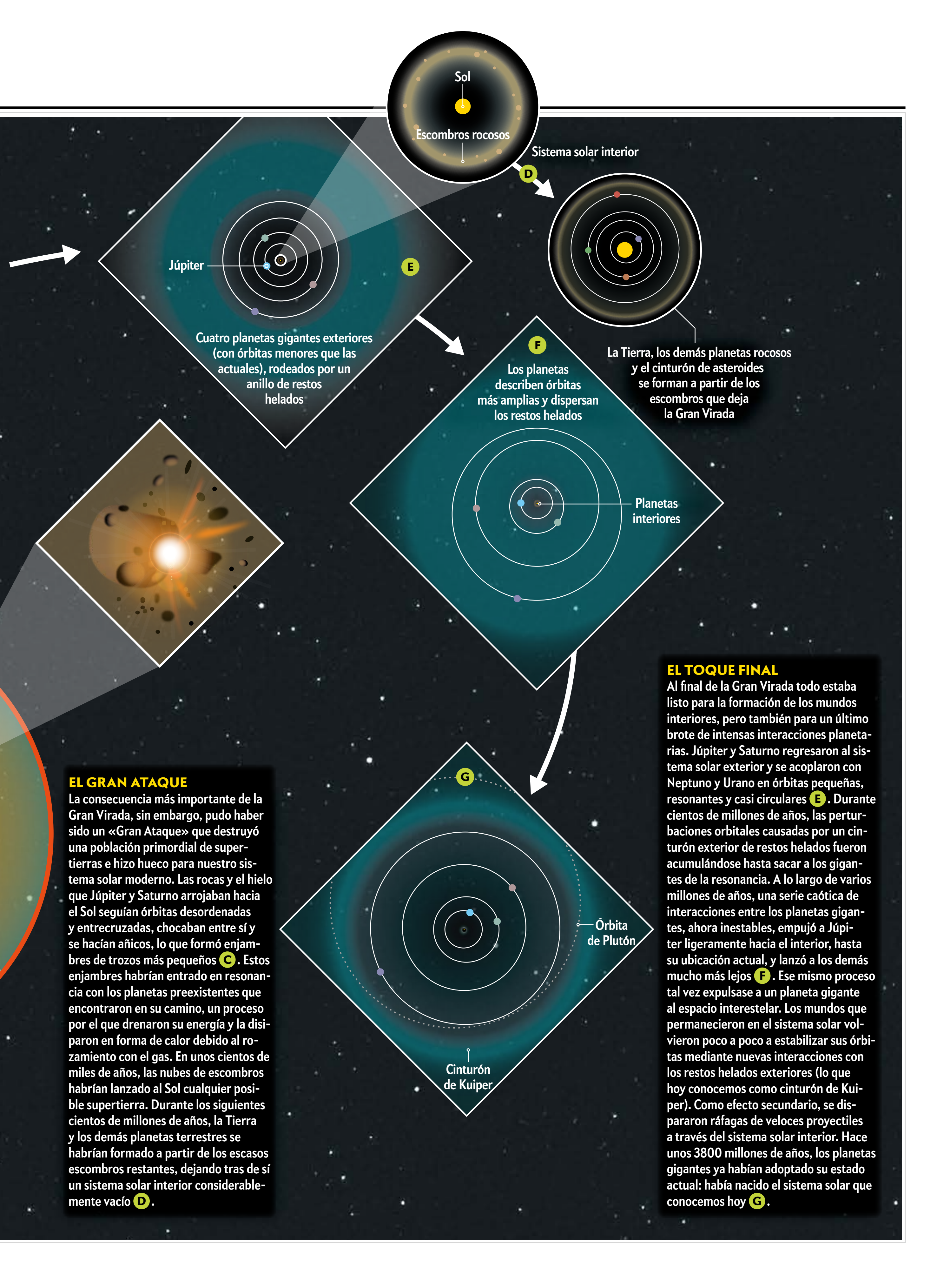
Los planetas se forman de manera muy similar a las estrellas: a partir de regiones densas en el seno de enormes nubes moleculares, las cuales colapsan sobre sí mismas y dan lugar a discos rotatorios de gas y polvo. El Sol comenzó como una protoestrella en el centro de uno de esos discos hace unos 4600 millones de años. Con el material seco y polvoriento de las regiones calientes del interior del disco debieron de formarse supertierras rocosas. En los confines exteriores, más fríos, los abundantes hielos alimentaron la formación de mundos congelados del tamaño de Neptuno. Los más grandes atrajeron la mayoría del gas, aumentando de tamaño hasta convertirse en Júpiter y Saturno, y comenzaron a derivar hacia el Sol sobre espirales de gas (*página siguiente*).

JEN CHRISTIANSEN



LA GRAN VIRADA

A lo largo de unos 100.000 años, mientras se desplazaba hacia el interior con Saturno siguiéndole los pasos, Júpiter actuó como una máquina quitanieves gravitatoria que empujó varias masas terrestres de material helado hacia el sistema solar interior. La influencia gravitacional mutua de ambos planetas fue abriendo un hueco en el disco **A**. Júpiter y Saturno entraron en resonancia orbital, con Júpiter dando tres vueltas alrededor del Sol por cada dos de Saturno. Esa resonancia hizo que los planetas torciesen su trayectoria: frenaron su migración hacia el interior y volvieron como un bumerán hacia el exterior en alrededor de medio millón de años, dispersando escombros a su paso **B**. La redistribución de material en el disco provocada por esta «Gran Virada» (el viaje de ida y vuelta de Júpiter y Saturno), explica de manera convincente el minúsculo tamaño de Marte y la composición actual del cinturón de asteroides.



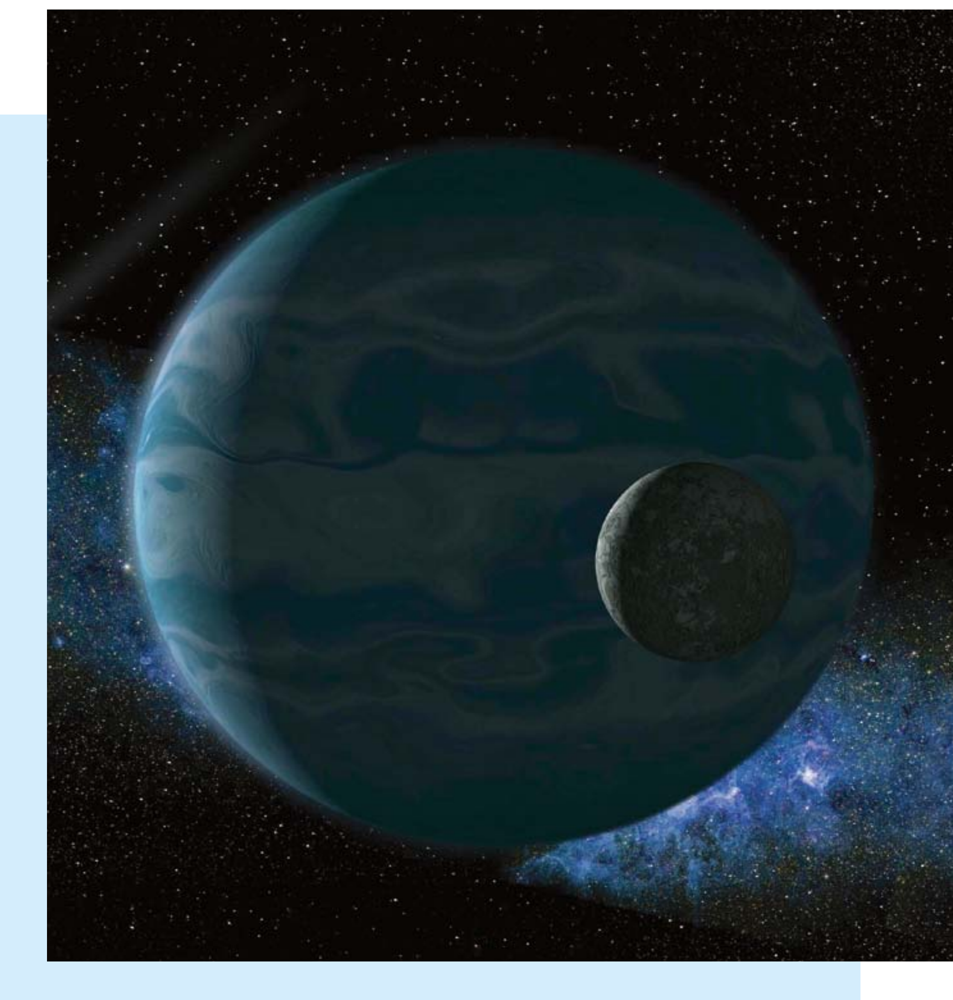
EL GRAN ATAQUE

La consecuencia más importante de la Gran Virada, sin embargo, pudo haber sido un «Gran Ataque» que destruyó una población primordial de supertierras e hizo hueco para nuestro sistema solar moderno. Las rocas y el hielo que Júpiter y Saturno arrojaban hacia el Sol seguían órbitas desordenadas y entrecruzadas, chocaban entre sí y se hacían añicos, lo que formó enjambres de trozos más pequeños **C**. Estos enjambres habrían entrado en resonancia con los planetas preexistentes que encontraron en su camino, un proceso por el que drenaron su energía y la disiparon en forma de calor debido al rozamiento con el gas. En unos cientos de miles de años, las nubes de escombros habrían lanzado al Sol cualquier posible supertierra. Durante los siguientes cientos de millones de años, la Tierra y los demás planetas terrestres se habrían formado a partir de los escasos escombros restantes, dejando tras de sí un sistema solar interior considerablemente vacío **D**.

EL TOQUE FINAL

Al final de la Gran Virada todo estaba listo para la formación de los mundos interiores, pero también para un último brote de intensas interacciones planetarias. Júpiter y Saturno regresaron al sistema solar exterior y se acoplaron con Neptuno y Urano en órbitas pequeñas, resonantes y casi circulares **E**. Durante cientos de millones de años, las perturbaciones orbitales causadas por un cinturón exterior de restos helados fueron acumulándose hasta sacar a los gigantes de la resonancia. A lo largo de varios millones de años, una serie caótica de interacciones entre los planetas gigantes, ahora inestables, empujó a Júpiter ligeramente hacia el interior, hasta su ubicación actual, y lanzó a los demás mucho más lejos **F**. Ese mismo proceso tal vez expulsase a un planeta gigante al espacio interestelar. Los mundos que permanecieron en el sistema solar volvieron poco a poco a estabilizar sus órbitas mediante nuevas interacciones con los restos helados exteriores (lo que hoy conocemos como cinturón de Kuiper). Como efecto secundario, se dispararon ráfagas de veloces proyectiles a través del sistema solar interior. Hace unos 3800 millones de años, los planetas gigantes ya habían adoptado su estado actual: había nacido el sistema solar que conocemos hoy **G**.

El Planeta Nueve del espacio exterior



¿Encaja el recientemente propuesto «Planeta Nueve» con las últimas ideas sobre el origen del sistema solar?

Michael D. Lemonick

Que el sistema solar se reorganizase violentamente en un pasado remoto puede explicar la existencia de los cuerpos helados del cinturón de Kuiper y la nube de Oort, el bombardeo de asteroides que sufrieron los planetas interiores hace miles de millones de años y la aparente ausencia de las llamadas supertierras, que abundan en otros sistemas planetarios. Pero ahora los expertos tienen algo nuevo con lo que lidiar: un supuesto planeta, de una masa quizá diez veces mayor que la terrestre, que podría orbitar en las oscuras regiones situadas más allá de Plutón. Si existe ese mundo, apodado Planeta Nueve, su gravedad podría ser la razón de que un puñado de objetos del cinturón de Kuiper describan trayectorias sospechosamente coordinadas alrededor del Sol.

Con todo, también podría ser un nuevo indicio de los tortuosos cambios que sufrió el sistema solar en sus primeros tiempos. Con una distancia mínima al Sol estimada en 30.500 millones de kilómetros (cinco veces más que la distancia media de Plutón), es poco probable que este enorme mundo pudiera haberse formado donde se encuentra ahora, dado que allí no habría habido material suficiente. «Si existe», dice Harold F. Levison, teórico experto en formación planetaria del Instituto de Investigación del Sudoeste, en EE.UU., «lo más probable es que se formara en la región comprendida entre unas cinco y veinte [distancias Tierra-Sol] y que fuese expulsado por [su interacción gravitatoria con] Júpiter o Saturno».

Sobre este punto no hay discusión. Júpiter, en particular, tiene tanta masa, apunta Scott Tremaine, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, que «lo mismo le da dispersar un cometa [en el lenguaje de la física, desviarlo de su rumbo, como en una colisión] que un planeta de diez masas terrestres». Sin embargo, una vez expulsado, un planeta tendería a seguir su camino hasta acabar escapando al espacio interestelar. Las probabilidades de que, en vez de eso, se estableciese en una órbita alrededor del Sol son ínfimas. Estadísticamente, señala Levison, para acabar con uno en una órbita así, tendrían que haber existido desde el principio entre 50 y 100 planetas, cosa que considera poco probable.

Por supuesto, si los astrónomos observaran realmente el Planeta Nueve a través de un telescopio, la cuestión de la probabilidad dejaría de ser relevante. Aun así, los teóricos deberían enfrentarse a la pregunta de cómo sucedió algo tan improbable. «Mi conjetura», señala Tremaine, «es que el proceso de dispersión es más eficiente de lo que el modelo al uso nos lleva a creer»; es decir, que el porcentaje de objetos arrojados al exterior que logran mantenerse dentro de los confines del sistema solar sería mayor de lo esperado.

Según Ben Bromley, de la Universidad de Utah, una manera en la que esto pudo ocurrir es que la dispersión de la supertierra sucediera muy pronto en la vida del sistema solar, antes de que el gas del disco protoplanetario que constituyó los planetas se disipase. En ese caso, señala Bromley, «el planeta podría haber interaccionado con el gas y haberse asentado en las quimbambas».

Nathan Kaib, teórico de la Institución Carnegie para la Ciencia, apunta que, en caso de que exista, el Planeta Nueve tal vez no provenga del sistema solar. El Sol no se formó solo, sino en un cúmulo de miles de estrellas, cada una probablemente con su propio sistema planetario. Al menos algunos de esos sistemas habrían sufrido su propia reorganización violenta y habrían expulsado objetos tal y como, supuestamente, ocurrió en el sistema solar. Kaib opina que el Sol podría haberlos capturado.

Cuál es la mejor explicación dependerá de cuál resulte ser la órbita del Planeta Nueve. De momento, sus proponentes solo han calculado un abanico de posibilidades. Si existe este planeta, los científicos deberían ser capaces de descubrir cómo llegó hasta su posición actual. La respuesta a si el Planeta Nueve encaja con las ideas actuales sobre el sistema solar primitivo es, de acuerdo con Tremaine, «un claro "tal vez"».

Michael D. Lemonick *es jefe de opinión de* Scientific American.

RON MILLER

Viene de la página 22
Con todo, la casualidad quiso que esta no fuera la última fase en la evolución del sistema solar.

La Gran Virada y el coetáneo Gran Ataque concertaron todavía un brote final de violencia interplanetaria en la historia del sistema solar, un último toque que acercó el séquito de mundos de nuestro Sol a la configuración que observamos hoy. Este último arrebato violento recibe el nombre de Bombardeo Intenso Tardío: un período de hace entre 4100 y 3800 millones de años durante el cual el sistema solar se convirtió temporalmente en una galería de tiro, con ráfagas de planetesimales golpeando por doquier. Hoy podemos ver su huella en los enormes cráteres que pueblan la Luna.

En 2005, con la colaboración de varios colegas del Observatorio de la Costa Azul, uno de nosotros (Morbidelli) creó el llamado «modelo de Niza», así llamado por la localización del observatorio. Dicho modelo da cuenta de la manera en que las interacciones entre los planetas gigantes pudieron desencadenar el bombardeo de planetesimales. Donde termina la Gran Virada, empieza el modelo de Niza.

Los planetas gigantes, que estaban muy juntos, aún eran resonantes entre sí, pero también sentían los ligeros tirones gravitatorios de los planetesimales helados exteriores. En realidad, su estabilidad pendía de un hilo: al acumularse a lo largo de millones de órbitas y cientos de millones de años, esos tirones, que por separado eran insignificantes, fueron cambiando ligeramente el movimiento de los planetas gigantes y minando poco a poco el delicado equilibrio de resonancias que los mantenía unidos. El momento crítico llegó cuando uno de aquellos planetas dejó de estar en resonancia con otro. Entonces se destruyó el equilibrio y se desencadenó una caótica serie de perturbaciones planeta-planeta, las cuales empujaron a Júpiter ligeramente hacia el interior, a la vez que dispersaron a los otros gigantes hacia el exterior. En el breve lapso —desde el punto de vista astronómico— de unos pocos millones de años, el sistema solar exterior experimentó una impresionante transición desde un estado muy compacto y casi circular hasta una configuración expandida y desordenada, caracterizada por planetas con órbitas amplias y excéntricas. Las interacciones entre los planetas gigantes fueron tan violentas que uno o más de ellos pudieron haber sido expulsados al espacio interestelar.

Si la evolución dinámica se hubiera detenido aquí, la estructura del sistema solar exterior habría encajado perfectamente con la que nos revelan los exoplanetas gigantes, muchos de los cuales ocupan órbitas excéntricas alrededor de sus estrellas. Afortunadamente, sin embargo, el mismo disco de planetesimales helados que desencadenó el caos también ayudó a erradicarlo mediante posteriores interacciones con las excéntricas órbitas de los planetas gigantes. Júpiter y los demás gigantes expulsaron, uno por uno, a la mayoría de los planetesimales que pasaban cerca de ellos. Eso provocó que los gigantes fuesen perdiendo energía orbital y que sus trayectorias volvieran a ser circulares. La mayoría de los planetesimales fueron arrojados más allá del alcance gravitatorio del Sol, pero una pequeña parte se mantuvo ligada a él: de esta manera nacía el disco de restos helados que hoy conocemos como cinturón de Kuiper.

UN NOVENO PLANETA, UNA TEORÍA DEFINITIVA

Un paciente trabajo de observación con los mayores telescopios del mundo está revelando poco a poco toda la extensión del cinturón de Kuiper. Este ha resultado tener una estructura inesperada, con un comportamiento muy peculiar de sus objetos más lejanos, situados en el límite de lo detectable. A pesar de que se encuentran a diferentes distancias del Sol, las órbitas de estos cuerpos están muy agrupadas, como si todos ellos estuvieran sometidos a una perturbación común de gran magnitud. Las simulaciones por ordenador realizadas por Batygin y Michael E. Brown, del Instituto de Tecnología de California, han demostrado que esta situación se produciría de manera natural si existiese un noveno planeta, aún no observado, con una masa unas diez veces mayor que la terrestre y situado en una órbita muy excéntrica alrededor del Sol, con un período de unos 20.000 años. Es poco probable que ese planeta se haya formado tan lejos, aunque resulta concebible que se trate de un objeto que fue expulsado desde una posición más cercana durante la infancia del sistema solar.

En caso de que se confirmase su existencia, este noveno planeta pondría límites muy estrictos a las distintas teorías que es posible formular para explicar todas las anomalías de nuestro extraño y vacío sistema solar. Ahora mismo, los astrónomos están disponiendo algunos de los mayores telescopios de la Tierra para buscar con denuedo este presunto planeta. Su descubrimiento podría ser el penúltimo capítulo en la larga y compleja historia de cómo hemos llegado a descubrir nuestro lugar en el universo; una historia que solo cabrá coronar con la conclusión, aún por escribir, del día en que por fin encontremos mundos con vida alrededor de otras estrellas.

Al igual que secuenciar las cadenas de ADN revela la historia de las migraciones de la humanidad por la superficie de nuestro pequeño mundo, las pistas astronómicas han permitido que las simulaciones por ordenador reconstruyan el majestuoso errar de los planetas del sistema solar durante sus miles de millones de años de vida. Desde su nacimiento en agitadas nubes moleculares, pasando por la formación de sus primeros planetas y las agonías de crecimiento y destrucción de la Gran Virada, el Gran Ataque y el modelo de Niza, hasta llegar a la aparición de la vida y de la capacidad de sentir en torno a una de las estrellas de la inmensa Vía Láctea, la biografía completa del sistema solar constituiría uno de los logros más significativos de la ciencia moderna. Y, sin duda, una de las historias más impresionantes que jamás puedan ser contadas. IyC

PARA SABER MÁS

Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system. K. Tsiganis et al. en *Nature*, vol. 435, págs. 459-461, mayo de 2005.
A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. Kevin J. Walsh et al. en *Nature*, vol. 475, págs. 206-209, julio de 2011.
Dynamical evolution of planetary systems. Alessandro Morbidelli en *Planets, stars and stellar systems*, vol. 3: *Solar and stellar planetary systems*, dirigido por Terry D. Oswalt, Linda M. French y Paul Kalas. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013.
Jupiter's decisive role in the inner solar system's early evolution. Konstantin Batygin y Gregory Laughlin en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 112, n.º 14, págs. 4214-4217, abril de 2015.
Evidence for a distant giant planet in the solar system. Konstantin Batygin y Michael E. Brown en *Astronomical Journal*, vol. 151, n.º 2, art. 22, febrero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Migración planetaria. Renu Malhotra en *IyC*, noviembre de 1999.
Sistemas planetarios extrasolares. Gregory P. Laughlin en *IyC*, enero de 2007, y en «Planetas», colección *Temas* de *IyC* n.º 53, 2008.
La génesis de los planetas. Douglas N. C. Lin en *IyC*, julio de 2008.
En busca del planeta X. Michael D. Lemonick en *IyC*, abril de 2016.
¿Se ha encontrado el Planeta Nueve? Pablo Santos Sanz en *IyC*, abril de 2016.



NEUROBIOLOGÍA

LA DESESPERANTE SENSACIÓN DE picor

Solo ahora han comenzado a entenderse las bases moleculares de esta molestia corporal. Los resultados abren la puerta al tratamiento de los casos crónicos y agudos

Stephani Sutherland

EN SÍNTESIS

El picor agudo es una señal de alarma para que evitemos insectos y plantas venenosas. Pero en muchos casos, sus formas crónicas surgen de forma misteriosa, sin causa aparente.

Las causas más frecuentes del picor, como la picadura de un insecto o agresiones similares sufridas por la piel, estimulan la secreción de histamina por parte de las células inmunitarias, sustancia que a veces desata una comezón insufrible.

Los hallazgos de los últimos años han revelado más detalles sobre los procesos moleculares que se esconden tras el prurito, lo que ha abierto la puerta al desarrollo de nuevos tratamientos para los casos agudos y crónicos.

Los avances se deben a la identificación de varios pruritógenos (sustancias que provocan picor) distintos de la histamina y de la mejor definición de la relación entre prurito y dolor.

BRIAN STAUFFER

Stephani Sutherland es doctora en neurociencia y escritora científica.

T

ODO COMENZÓ COMO UN PEQUEÑO SARPULLIDO EN LA PANTORRILLA, QUE APAREció al final de un viaje a Las Vegas con su novio, a finales del verano de 2010. «Tenía una mancha en la pierna que me picaba horrores, pero no era como la picadura de un mosquito. Era lisa, sin relieve alguno. Hiciera lo que hiciera no cesaba de picar», explica Nicole Burwell, de 40 años. De modo que decidió tomarse un comprimido de Benadryl (difenhidramina), un antihistamínico de venta sin receta, y viajó durmiendo de un tirón las cuatro horas de trayecto que la separaban de su casa en Claremont, California. Cuando despertó, el picor seguía allí. A la semana siguiente el sarpullido empeoró y, con él, la comezón, así que acudió al médico. «Para entonces se había extendido también a la otra pierna.» Nicole se pasó los tres años siguientes luchando contra un rabioso sarpullido de rojo subido que se diseminó por todo el cuerpo y cubrió sus brazos, piernas, manos, torso y espalda. Pero pese a su aspecto horroroso, lo que más le molestaba, con diferencia, era el picor.

«Me concomía. No podía estar quieta; era incapaz de prestar atención a nada. Estaba como loca», confiesa. Así que concibió una rutina diaria. A la vuelta del trabajo como diseñadora de cocinas se tomaba dos comprimidos de Benadryl y se preparaba un combinado de *bourbon* y 7Up sin azúcar. «Llegaba a casa y rompía a llorar de lo que me picaba.» Nicole recurría a las bolsas de hielo para mitigar la comezón y conciliar el sueño.

No es la única afectada: se calcula que uno de cada cinco adultos sufrirá en algún momento de su vida un episodio de prurito de más de seis semanas. El picor crónico puede surgir a raíz de una larga lista de trastornos: enfermedades cutáneas como el eccema o la psoriasis, insuficiencia renal, lesiones nerviosas provocadas por el herpes o la diabetes, ácaros alojados en la piel, reacciones alérgicas a medicamentos, o incluso el embarazo. En los peores casos, el prurito genera una grave incapacidad y puede abocar al suicidio, una idea que, ciertamente, se le pasó por la cabeza a nuestro testimonio. Sin embargo, la mayoría de los médicos todavía lo infravaloran, pues lo consideran una mera molestia. «Si no se le da importancia resulta difícil relacionarlo con algo. Pero, en realidad, estamos empezando a comprender que el prurito supone un grave problema para muchas personas», comenta Ethan Lerner, dermatólogo e investigador del trastorno en el Hospital General de Massachusetts.

«No todos los picores son iguales», matiza Gil Yosipovitch, investigador de la Universidad Temple. Cuando es agudo, cumple una función importante: actúa como un centinela que nos alerta de los animales y las plantas venenosas. Pero, hasta hace poco, no se entendía muy bien de qué modo la presencia de sustancias irritantes en la piel desata esa molesta sensación. Los cuadros crónicos como el de Nicole suponen una incógnita aún mayor. Por suerte, recientemente se han hecho grandes progresos en la comprensión del trastorno, lo que nos está acercando al desarrollo de tratamientos contra su forma crónica y aguda. En concreto, se han descubierto en las terminaciones nerviosas de la piel nuevos receptores moleculares de las sustancias pruriginosas, o pruritógenos (causantes del picor), que detectan su presencia. El descubrimiento también revela que una parte del sistema nervioso está dedicada específicamente al picor y se extiende desde la capa externa de la piel hasta los principales centros del cerebro.

EL PICOR CLÁSICO

El picor que mejor conocemos surge cuando el organismo reacciona a una simple picadura de mosquito. Una vez saciado, el insecto deja tras de sí proteínas y otras sustancias que nuestro sistema inmunitario reconoce como extrañas y, por tanto, pone en marcha una reacción en la zona de la picadura. Las células inmunitarias de la piel liberan citocinas, diminutos mensajeros químicos que amplifican la respuesta. La primera sensación de picor se percibe en la piel; lo justo como para hacer que uno se rasque. Eso, a su vez, daña la capa externa protectora de la epidermis. Posteriormente, las células inmunitarias liberan gran cantidad de histamina, una de las principales causantes del picor, entre otros pruritógenos. La histamina activa sus receptores, radicados en las finas terminaciones nerviosas de la piel, desencadenando la familiar sensación de picor. ¿O tal vez no? Al parecer, la histamina no es tan decisiva como venían creyendo los especialistas desde mucho tiempo atrás.

Hace solo una década, los receptores de la histamina eran los únicos detectores del picor que se conocían, por lo que aún se siguen prescribiendo antihistamínicos como antipruriginosos, junto con los corticoesteroides, que rebajan la inflamación. Pero hace tiempo que se sospecha que unos compuestos químicos distintos desencadenan otros tipos de picor, fundamentalmente porque los antihistamínicos sirven de muy poco a muchos pacientes. Tal y como comenta Lerner, los antihistamínicos son más o menos eficaces frente a algunas reacciones alérgicas, pero no en la mayoría de los cuadros de prurito crónico. «El médico

Bajo nuestra piel

El picor actúa como un centinela que alerta de la presencia de insectos, plantas venenosas o ciertas sustancias. En la reacción inmunitaria desatada, por ejemplo, por la picadura de un mosquito, se segrega histamina, una conocida molécula pruriginosa. Esta interactúa con el receptor de una neurona **A** que, a su vez, activa otra molécula (TRPV1), lo que genera un impulso nervioso en la célula e induce la sensación de picor. Una familia recién descubierta de receptores relacionados con el picor (Mrgprs) reacciona a la cloroquina, uno de los principios activos de los medicamentos antipalúdicos **B**. Los receptores Mrgprs activan los receptores TRPA1.

EMILY COOPER

aumenta la dosis y acaba funcionando simplemente porque provoca somnolencia.» Esta fue la experiencia de Nicole: un médico tras otro le recetaba corticoesteroides (con los que engordó rápidamente más de 9 kilos) y una lista de antihistamínicos que no paliaban el picor. «Solo me ayudaba el Benadryl, y únicamente porque me calmaba lo suficiente como para poder dormir», explica. Para descubrir otros receptores del picor, los científicos siguieron la pista de sustancias pruriginosas poco conocidas que lo causan sin el concurso de la histamina.

El primero de esos descubrimientos fue el frijol aterciopelado (*Mucuna pruriens*), una planta usada como ingrediente en los polvos picapica que se venden como artículo de broma. «Cuando se aplica histamina sobre la piel, se desata una sensación de puro picor», afirma Lester. «Pero cuando hablas con los pacientes que padecen eccema, lo que te describen es una sensación punzante o de quemazón. Esa es justamente la sensación que provoca el frijol aterciopelado.» En la década de los cincuenta del pasado siglo, el difunto Walter Shelley, pionero

en la investigación del prurito, especulaba con la idea de que el factor pruriginoso del frijol era una enzima que hidrolizaba las proteínas, una proteasa a la que bautizó con el nombre de mucunaína. En 2008 se confirmó por fin su sospecha, cuando Lerner descubrió que la mucunaína activa un receptor radicado en la piel y las neuronas: el receptor activado por proteasas de tipo 2 (PAR2). Ciertas proteasas, entre ellas la citada, arrancan un diminuto fragmento de la proteína PAR2 y eso activa el receptor. Ese descubrimiento llevó a una nueva hipótesis, según la cual, las proteasas y los fragmentos peptídicos que estas generan son intermediarios clave en la sensación del picor, en el caso de PAR2 y de otros receptores. Las proteasas son ubicuas y se hallan tanto en la saliva de los insectos como en las secreciones bacterianas, lo que quizás explique por qué las picaduras y las infecciones causan a veces intenso picor.

La segunda pista que condujo a los nuevos receptores del prurito procede de la cloroquina, un medicamento preventivo contra el paludismo que irónicamente causa picor. Este efecto secundario, que los antihistamínicos no alivian, hace que muchos africanos se nieguen a tomarla, pero la ha convertido en una valiosa herramienta para los estudiosos del prurito. Uno de ellos es Xinzhong Dong, que por entonces trabajaba en el laboratorio de David Anderson, en el Instituto de Tecnología de California. En 2001 Dong descubrió una familia de receptores activados por sustancias desconocidas a los que se denominó Mrgpr (siglas en inglés de receptores acoplados a la proteína G y relacionados con la proteína Mas). Algunos solo se hallaban en las neuronas sensoriales, lo que indicaba que podían detectar estímulos externos, si bien su naturaleza seguía siendo un misterio.

Dong suministró cloroquina a células que acogían esos receptores Mrgpr para averiguar si podrían ser receptores del picor desconocidos. En una investigación publicada en 2009, Dong, hoy en la Universidad Johns Hopkins, y Anderson crearon ratones transgénicos carentes de uno de los Mrgpr propios de las células sensoriales, al que llamaron MrgprA3. «Los ratones corrientes respondieron a la cloroquina rascándose con frenesí», pero los transgénicos carentes del MrgprA3 no. «Sin él, simplemente no percibían el picor. Ese fue nuestro gran logro», afirma Dong. También hallaron otras dos proteínas de la familia Mrgpr que respondían a sustancias pruriginosas.

Gracias a esos dos compuestos inusuales, la mucunaína y la cloroquina, ha sido posible descubrir los primeros sensores del picor desde que en la segunda mitad del siglo xx se descubrieran los receptores de la histamina. «Pero lo importante no es dar con el receptor de la cloroquina o del frijol; lo importante de veras, es hallar lo que activa las neuronas pruritoceptivas que no responden a la histamina en los casos crónicos», afirma Diana Bautista, investigadora de la Universidad de California en Berkeley. En este momento, los expertos andan a la zaga de esas sustancias. «Probablemente haya un pequeño número de moléculas de la piel que activen los receptores Mrgpr y descubrirlas abriría la puerta a dianas terapéuticas y a tratamientos eficaces», augura Lerner.

MECANISMOS

¿Por qué nos rascamos?

Uno siente picor y no hay más remedio que rascarse. ¡Ah, qué alivio! El picor remite, al menos de momento. ¿Por qué rascarnos nos reconforta así? El alivio resulta de la actividad del sistema nervioso central. Al rascarnos se estimulan las terminaciones nerviosas de la médula espinal y estas liberan las moléculas analgésicas del organismo –los opioides endógenos— que, según sabemos ahora, también calman el picor. Desde la médula espinal, las neuronas emiten señales que inhiben el giro cingular anterior, una región del cerebro que el prurito estimula con intensidad; cuando esta región se serena, también lo hace el picor. «El picor y el rascarse están interconectados de manera singular», afirma Gil Yosipovitch, investigador de la Universidad Temple.

La sensación de rascarse no es especialmente placentera y, sin embargo, cuando nos alivia el picor resulta sumamente reconfortante. Yosipovitch descubrió la razón en 2013, en el curso de un estudio en que se tomaron imágenes del cerebro de personas mientras se rascaban a causa de un picor agudo y descubrió que con ello se activaba el sistema de recompensa cerebral, que también se estimula, entre otras cosas, al consumir drogas.

En concreto se activaron las regiones relacionadas con el placer, los antojos y la motivación, como el cuerpo estriado y la corteza prefrontal. Cuando las personas que se frotaban padecían prurito crónico, el sistema de recompensa se activaba con más intensidad que en los sujetos sanos, lo que indica que, con el tiempo, la recompensa que genera rascarse puede aumentar. Ese descubrimiento es un indicio de su naturaleza adictiva y explica por qué no podemos resistirnos cuando surge el picor. Cuando este es crónico se pone en marcha «un círculo vicioso de prurito y rascado que no se puede parar», afirma Yosipovitch. Conclusión para los médicos: «No digan a los pacientes que no se rasquen. Se tienen tantas ganas que no lo pueden evitar».

¿Por qué el picor nos compele tan intensamente a restregar la zona afectada? Consideremos su propósito evolutivo: el picor manda una señal de alarma y al rascarnos nos deshacemos de los intrusos y movilizamos el sistema inmunitario. «Nuestros antepasados vivían en entornos muy pruriginosos», plagados de plantas e insectos cuyas picaduras representaban una amenaza real. Esa amenaza explica la naturaleza contagiosa del picor. «Cuando vemos que alguien se está rascando, también empezamos a hacerlo», como si fuera a modo de prevención, explica Yosipovitch.

¿UNA CONEXIÓN CON EL DOLOR?

Otra forma con la que los investigadores tratan de entender mejor el picor consiste en mirar cómo está conectado el sistema nervioso para responder a él, y esto lleva, inevitablemente, al estudio del origen del picor. Desde los años sesenta se sabe con certeza que diversas neuronas nociceptivas (sensibles al dolor), que detectan estímulos dañinos, son distintas de otras neuronas sensoriales. Algunas están especializadas en la detección del calor, otras en la del frío y otras en la de la presión mecánica. Pero ¿qué ocurre con el picor?, ¿pueden también percibirlo las neuronas nociceptivas o existen otras especializadas en ello?; y si es así, ¿hay más de un tipo?

«El picor y el dolor guardan una íntima relación», asegura Bautista. A medida que el dolor de una herida en proceso de curación remite, toma el relevo el picor, tal y como sucede con algunos analgésicos. Y el dolor provocado al rascarse a veces atenúa el picor. Ese solapamiento de las sensaciones condujo a algunos a meter el dolor y el picor en el mismo saco. «Se pensaba que un estímulo pequeño, como un jersey de lana que pica, activaba los mismos receptores y las mismas células que transmiten el dolor», comenta Bautis-

ta. La idea era que la activación leve provocaba picor, en tanto que los estímulos intensos causaban dolor.

Y, sin embargo, la aplicación sobre la piel de histamina —o de frijol aterciopelado o cloroquina— no produce dolor. Por su parte, los estímulos dolorosos casi siempre causan dolor de distinta intensidad, pero no picor. Y las neuronas nociceptivas radican muy por debajo de la piel, el único lugar donde se percibe el prurito. En los últimos años la teoría de la intensidad ha ido perdiendo fuerza; hoy la opinión mayoritaria es que el prurito se transmite a través de nervios y receptores propios. Además, se postula que hay muchos tipos de neuronas pruritoceptivas (sensibles al picor), cada uno especializado en la detección de un estímulo pruriginoso distinto. «La verdadera cuestión que planteaba el frijol aterciopelado era si existía más de un tipo de picor, del mismo modo que hay varios tipos de dolor», explica Lerner. «Y la respuesta es que sí.»

Ahora bien, en 2003, investigadores alemanes y suecos pusieron en duda la existencia de los nervios especializados en el picor tras descubrir que algunas neuronas humanas que son activadas por la histamina también lo hacen con el calor intenso y la capsaicina, la sustancia que confiere el gusto picante a las guindillas. Esa duplicidad parecía indicar que las neuronas supuestamente especializadas en el picor contenían el receptor de la capsaicina, un receptor característico de las neuronas nociceptivas llamado TRPV1 (siglas en inglés de receptor de potencial transitorio V1). Y si esas neuronas albergan el receptor nociceptivo TRPV1, ¿cómo pueden estar especializadas en el picor?

Allan Basbaum, investigador del dolor de la Universidad de California en San Francisco, descubrió que, pese a la reputación del TRPV1 como receptor del dolor, este también se necesitaba para desatar el picor provocado por la histamina, demostrando así que los receptores TRP no se limitan a los estímulos dolorosos. El receptor histaminérgico parece actuar en conjunción con el TRPV1 para que las neuronas transmitan el impulso nervioso eléctrico denominado potencial de acción. Esta visión, empero, quedaba empañada por otras sustancias pruriginosas ajenas a la histamina, que no actúan a través del TRPV1.

Entretanto, Bautista, que ha dedicado su carrera al estudio de los receptores TRP, andaba tras moléculas distintas de la histamina que transmiten señales pruriginosas. El descubrimiento de Basbaum de que el TRPV1 intervenía en la generación de la sensación de picor causada por la histamina le brindó una pista: quizás otros receptores TRP parecidos estarían implicados en otros tipos de picor. Así que centró su atención en otro receptor del dolor, el TRPA1, sensible a las sustancias inflamatorias y al aceite de mostaza, y descubrió que era necesario para percibir el picor provocado por la cloroquina. No había pasado una hora desde que presentara su hallazgo en un congreso en 2009, cuando Bautista recibió una llamada de Dong y, sin dudarlo, acordaron colaborar. Ambos siguieron trabajando y demostraron que el TRPA1 y el receptor MrgprA3 operaban juntos para activar las neuronas en respuesta a la cloroquina. «Ese descubrimiento reforzó la hipótesis de que existían distintas poblaciones de neuronas implicadas en los diversos tipos de picor», comenta Bautista. Y abrió una nueva vía para el desarrollo de tratamientos antipruriginosos. «El TRPA1 es una diana terapéutica sumamente interesante por su importancia en múltiples trastornos inflamatorios, entre ellos el prurito. Si pudiésemos inhibirlo de algún modo en las personas afectadas, posiblemente sería muy útil como tratamiento.»

Llegados a este punto, los innumerables estudios bastaron para demostrar que los receptores nociceptivos también participan en la percepción del picor. Pero seguía sin estar claro si las neuronas sensoriales especializadas en la transmisión del picor y las sensibles al dolor podrían, de alguna manera, transmitir ambos tipos de estímulos. Dong decidió abordar esta incógnita con un estudio en 2013. Su equipo creó ratones transgénicos desprovistos de las neuronas presuntamente especializadas en el picor: las portadoras del recién descrito receptor MrgprA3. En ausencia de estas, los ratones también perdían la facultad de sentir el picor, mientras que la sensación de dolor permanecía intacta.

Pero aún había que demostrar que los sensores del picor estaban realmente reservados a esa sensación y no percibían el dolor. Mediante un elegante experimento de genética, Dong creó ratones carentes del TRPV1 en todas las neuronas excepto en aquellas supuestamente especializadas en el picor. Cuando activaron el TRPV1 con capsaicina (un estímulo que suele ser doloroso) los ratones solo percibieron picor, nada de dolor. Eso afianzó la idea de las neuronas específicas del picor y demostró que albergaban algunos de los receptores propios de los nervios nociceptivos. ¿Por qué? «La naturaleza sencillamente reutiliza las moléculas para ambos tipos de sensación», asegura Dong.

Todos esos avances son fruto del estudio de las neuronas sensoriales que inervan la piel. De hecho, las últimas investigaciones indican que las células cutáneas participan también en la generación del picor al liberar sustancias pruriginosas que activan los nervios sensibles. Los complejos circuitos del prurito se extienden hasta la médula espinal, donde hace poco han sido halladas neuronas y moléculas señalizadoras exclusivamente dedicadas a él. Y los científicos están utilizando las técnicas de imagen del cerebro para comprender mejor la actividad neural que hay detrás de la singular —e irritante— sensación de picor.

En cuanto a Nicole, por fin se libró del prurito crónico a finales de 2013, cuando visitó al décimo médico, un eminente dermatólogo que recibe pacientes con picores intratables e inexplicables. Este llevó a cabo una batería exhaustiva de pruebas de alergia aplicando parches en su espalda, que reveló su alergia a un conservante presente en los productos de cuidado e higiene personal. «Se hallaba en todo lo que usaba», comenta. Una vez que se deshizo de ellos y los sustituyó por los productos aprobados que figuraban en una lista, el sarpullido y el picor desaparecieron.

Su caso ilustra lo poco que saben los médicos sobre el prurito: una prueba laboriosa, pero en definitiva sencilla, permitió hallar una solución igualmente sencilla que puso fin a tres años de suplicio. También hace patente la importancia de descubrir la raíz del problema, al tiempo que revela por qué la complejidad molecular de esta sensación continúa generando nuevos enigmas. IyC

PARA SABER MÁS

Living with itch: A patient's guide. Gil Yosipovitch y Shawn G. Kwatra. Johns Hopkins University Press, 2013.

Why we scratch an itch: The molecules, cells and circuits of itch. Diana M. Bautista, Sarah R. Wilson y Mark A. Hoon en *Nature Neuroscience*, vol. 17, n.º 2, págs. 175-182, febrero de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Prurito. Uwe Gieler y Bertram Walter en *MyC*, mayo/junio de 2009.

Combatir el dolor crónico. Stephani Sutherland en *IyC*, mayo de 2015.



TECNOLOGÍA

COMPUTACIÓN CUÁNTICA MODULAR

Un ambicioso programa de investigación intenta construir un ordenador cuántico a partir de la conexión de múltiples componentes diminutos

Christopher R. Monroe, Robert J. Schoelkopf y Mikhail D. Lukin



KYLE BEAN

Christopher R. Monroe es catedrático de física en la Universidad de Maryland y miembro del Instituto Cuántico Conjunto, un centro integrado por varias instituciones. Ha destacado desde hace más de veinte años por sus investigaciones en tecnología cuántica de la información.

Robert J. Schoelkopf es catedrático de física en Yale y director del Instituto Cuántico de dicha universidad. Su grupo es líder en el desarrollo de qubits de estado sólido para la computación cuántica.

Mikhail D. Lukin es catedrático de física en Harvard y codirector del Centro para Átomos Ultrafríos de Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Ha realizado contribuciones pioneras en varias áreas de la computación, comunicación y metrología cuánticas.

Durante las dos últimas décadas, los científicos han intentado aprovechar las peculiaridades del mundo cuántico para conseguir avances en la comunicación y el procesamiento de la información. Debido a los singulares fenómenos que rigen las escalas más pequeñas del universo —como que los electrones son a la vez partículas y ondas, que un objeto puede encontrarse en dos lugares al mismo tiempo, y que dos partículas pueden mantener un intrigante vínculo instantáneo incluso cuando se encuentran separadas—, las máquinas cuánticas harían triviales varias tareas de computación, comunicación y medición hasta ahora impensables.

Por ejemplo, un ordenador cuántico podría desbaratar códigos criptográficos hoy considerados inquebrantables [*véase* «La privacidad en la era cuántica», por Tim Folger, *en este mismo número*]. Pero, al mismo tiempo, cabría emplear las técnicas cuánticas para almacenar y comunicar información de forma que la privacidad quedase garantizada por las leyes de la física [*véase* «Los límites físicos de la privacidad», por Artur Ekert y Renato Renner; Investigación y Ciencia, enero de 2016], así como para simular procesos en materiales y sistemas químicos complejos que, de otra forma, serían intratables [*véase* «Mundos cuánticos simulados», por Oliver Morsch e Immanuel Bloch; Investigación y Ciencia, mayo de 2015]. Asimismo, los sistemas cuánticos podrían aumentar la precisión de los mejores cronómetros del mundo (los relojes atómicos) y servir como minúsculos sensores para medir las propiedades de sistemas químicos y biológicos a escala atómica o molecular, con aplicaciones que van desde la biología y la ciencia de materiales hasta la medicina.

Ese potencial ha hecho que gigantes como Google e Intel, agencias gubernamentales y nuevas compañías tecnológicas estén apostando con fuerza por la computación cuántica. También la comunidad académica se ha sumado a la carrera: solo en 2015, tres de las principales revistas científicas publicaron más de 3000 artículos en los que se mencionaba «computación cuántica» o «información cuántica».

Con todo, aún no existe una máquina cuántica a gran escala. La dificultad reside en que, por definición, un ordenador así tendría que operar en el régimen cuántico. Sin embargo, cuando tratamos de construir uno lo suficientemente grande para que resulte útil, el sistema tiende a obedecer las reglas clásicas del mundo macroscópico.

Fabricar un dispositivo que conserve un comportamiento cuántico a gran escala y que desarrolle toda la potencia de un procesador cuántico requerirá, probablemente, un enfoque modular: uno en el que múltiples unidades diminutas puedan conectarse entre sí sin echar a perder su naturaleza cuántica. Varios trabajos recientes han conseguido llevar esta idea más allá del plano teórico y han logrado demostraciones exitosas a pequeña escala. Tales avances están allanando el camino para materializar el extraordinario potencial de las máquinas cuánticas.

PROBABLEMENTE CERO, TAL VEZ UNO

Las primeras sugerencias de aprovechar el mundo cuántico para construir computadoras avanzadas llegaron a principios de los ochenta, de la mano de físicos y matemáticos como Richard Feynman, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), o David Deutsch, de la Universidad de Oxford. Sin embargo, la idea no pasó de la especulación hasta 1994, cuando Peter Shor, por entonces en los Laboratorios AT&T Bell, demostró que un

EN SÍNTESIS

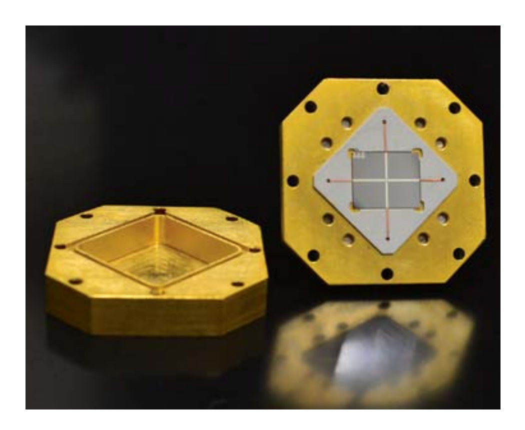
La principal dificultad para construir un ordenador cuántico funcional reside en que, al juntar un número cada vez mayor de partículas, estas pierden sus propiedades cuánticas.

La computación cuántica modular intenta vincular múltiples ordenadores cuánticos pequeños mediante conexiones mínimas que no arruinen su comportamiento cuántico.

Varias estrategias basadas en distintos tipos de qubits han demostrado resultar exitosas a pequeña escala. Tal vez pronto logren extenderse para formar sistemas mayores.

ordenador cuántico podría factorizar con rapidez grandes números enteros. Los primeros computadores cuánticos básicos llegaron a finales de los años noventa y principios de este siglo, cuando se logró construir algunos sistemas sencillos formados por unos pocos «bits» encarnados en átomos, moléculas o fotones.

Las ventajas de esta técnica sobre la computación clásica se deben a la singular naturaleza de las partículas cuánticas. A diferencia de los ordenadores tradicionales, donde la unidad básica de información (el bit) solo puede adoptar el valor 0 o 1, la unidad cuántica de información, el *qubit*, puede existir en ambos estados a la vez: probablemente 0 y tal vez 1, con igual probabilidad de valer 0 o 1, o en cualquier otra combinación ponderada de estados. Ello se debe a que las partículas cuánticas pueden encontrarse en dos estados físicos simultáneamente, un fenómeno conocido como superposición.



DISPOSITIVO CUÁNTICO: Una caja bañada en oro alberga un circuito para medir qubits superconductores.

Además de existir en dos estados a la vez, los qubits pueden estar relacionados entre sí por medio de una propiedad cuántica conocida como entrelazamiento. Este fenómeno permite que dos partículas mantengan un vínculo que hace que, al efectuar una acción sobre una de ellas, eso repercuta en la otra aunque ambas se encuentren muy separadas. Esta cualidad otorga a los computadores cuánticos la capacidad de procesar masivamente información en paralelo. En un conjunto de qubits entrelazados, una operación sencilla en uno de ellos puede afectar al estado de todos los demás. Incluso con unos pocos qubits, esos estados interdependientes de ceros, unos y sus superposiciones dan lugar a un enorme abanico de posibilidades. Unos pocos cientos de qubits pueden calcular una cantidad de resultados que supera en número al de partículas en el universo.

Hasta el momento se han creado numerosos sistemas de computación cuántica de tamaño reducido, los cuales emplean hasta diez qubits. Pero, a medida que añadimos más, resulta cada vez más difícil aislar el sistema del entorno, lo que acaba con las propiedades que hacen especiales a los ordenadores cuánticos. Una superposición de estados solo puede existir en aislamiento. Todo intento de observar una partícula prematuramente la obliga a «colapsar» en un único estado, a elegir una de las posibilidades. En ese momento, la mecánica cuántica deja de servirnos y los qubits se convierten en bits tradicionales. En otras palabras: las peculiares propiedades de los objetos cuánticos solo pueden observarse, por lo general, en sistemas muy pequeños, y desaparecen cuando dichos objetos se conectan por completo a un todo mayor. Los sistemas de gran tamaño suelen ser demasiado complejos y carecen del aislamiento necesario para exhibir un comportamiento cuántico. De hecho, nadie espera ver una pelota de tenis —ni una bacteria— en dos sitios a la vez.

SISTEMAS CUÁNTICOS MODULARES

Así pues, el reto consiste en ampliar un sistema sin echar a perder sus propiedades cuánticas imprescindibles. Una estrategia basada en añadir e interconectar sin más múltiples qubits en una gran red estará probablemente abocada al fracaso. Esta predicción parece verse corroborada por los resultados obtenidos hasta ahora por la compañía canadiense D-Wave Systems, cuyas máquinas cuentan con cientos o miles de qubits conectados entre sí. A pesar de que los representantes sostienen que sus dispositivos superan la velocidad de cálculo de los algoritmos clásicos, no hemos encontrado datos publicados que demuestren el entrelazamiento a gran escala o una mayor velocidad de operación.

La técnica modular, en cambio, nos ofrece una alternativa. Esta estrategia recuerda a la empleada por las compañías aéreas para diseñar sus rutas. La próxima vez que vuele, fíjese en los trayectos que figuran en la revista de a bordo: el mapa le dará una idea aproximada de cómo podría ser un ordenador cuántico a gran escala. Las aerolíneas no conectan cada ciudad con todas las demás, pues la logística y los costes asociados serían prohibitivos. En su lugar, utilizan unos pocos nodos centralizados para crear redes de conexiones indirectas. Sacrificar trayectos directos les permite crecer y manejar una red de destinos mucho mayor.

De manera similar, un computador cuántico modular no conectaría cada qubit con todos los demás, sino que emplearía unos pocos de ellos como nodos centrales. Las redes modulares ayudan a mantener un número manejable de interacciones entre qubits, al tiempo que conservan cada módulo aislado de interferencias externas. La pérdida de conectividad directa se ve compensada por la posibilidad de colaboración indirecta entre miles o incluso millones de qubits. Pero, a diferencia de los sistemas modulares al uso, como los procesadores multinúcleo, que usan el mismo tipo de conexión entre núcleos y en el interior de ellos, los sistemas cuánticos modulares pueden necesitar dos o más tipos de enlace para lograr el entrelazamiento y garantizar el aislamiento entre módulos.

Durante la última década se han desarrollado tres estrategias para llevar adelante esta idea, cada una con un tipo de qubit. Los tres autores de este artículo estamos desarrollando de manera independiente estas plataformas y creemos que, antes o después, darán lugar a ordenadores cuánticos de gran tamaño y a nuevas formas de procesar la información.

QUBITS ATÓMICOS

El qubit más natural es un átomo cuyos niveles de energía electrónicos o nucleares (en ocasiones llamados «estados de espín») se emplean para almacenar información. Los qubits atómicos se prestan a construir sistemas cada vez mayores, ya que los átomos de una misma especie son idénticos entre sí y no hay necesidad de manipularlos para combinarlos. Con ayuda de láseres, es posible enfriarlos hasta dejarlos casi en reposo, lo que se consigue transfiriendo momento del átomo a la luz. Esto se hace mientras los átomos están suspendidos en el interior de una cámara de vacío, donde no interaccionan con nada más.

Los qubits pueden implementarse tanto en átomos neutros como en iones. Para confinar qubits de átomos neutros, docenas de grupos de investigación en todo el mundo emplean haces láser focalizados o entramados de láseres conocidos como redes ópticas. Y, aunque resulta difícil controlar y acoplar átomos neutros como qubits individuales, ya existen numerosas vías de avance prometedoras.

CORTESÍA DE MICHEL H. DEVORET, UNIVERSIDAD YALE

Como alternativa, varios grupos usan átomos a los que se les ha sustraído un electrón. Estos interaccionan fuertemente entre sí a través de su repulsión eléctrica y pueden confinarse mediante campos electromagnéticos generados por electrodos cercanos. Gracias al enfriamiento por láser, cientos de iones atrapados pueden formar un cristal estacionario de átomos, los cuales se comportan como péndulos conectados por resortes.

Con láseres adicionales resulta posible agitar los iones y entrelazar sus estados de espín a través de las vibraciones de los átomos, una técnica propuesta en 1995 por Ignacio Cirac y Peter Zoller, por entonces ambos en la Universidad de Innsbruck. En las últimas dos décadas, este método ha permitido obtener avances asombrosos en el control y el entrelazamiento de qubits individuales. Más recientemente, los grupos liderados por uno de nosotros (Monroe), David J. Wineland, del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) estadounidense, y Rainer Blatt, de Innsbruck, han demostrado operaciones de entrelazamiento de alta calidad en hasta 20 iones atrapados.

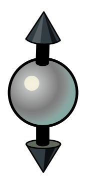
ESTRATEGIAS

Tres rutas hacia un ordenador cuántico

En teoría, un ordenador que funcionase según en las leyes cuánticas podría ejecutar cálculos imposibles para las computadoras actuales. Sin embargo, cuanto mayor se hace el ordenador, más difícil resulta conservar sus atributos cuánticos (*abajo*). Se cree que la solución pasa por construir numerosos ordenadores cuánticos pequeños y conectarlos en un conjunto mayor, una estrategia conocida como computación cuántica modular. A continuación se ilustran tres estrategias basadas en otros tantos tipos de bits cuánticos, o qubits.

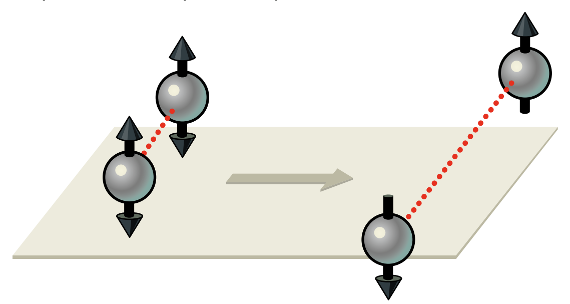
Propiedad cuántica 1: Superposición

Los átomos y las partículas subatómicas pueden adoptar múltiples estados físicos a la vez. Mientras que un objeto clásico, como una canica, solo puede girar en un sentido o en otro, las partículas cuánticas pueden encontrarse en dos «estados de espín» al mismo tiempo (*flechas*). Gracias a esta propiedad, los ordenadores cuánticos podrían comprobar simultáneamente varias soluciones a un problema.



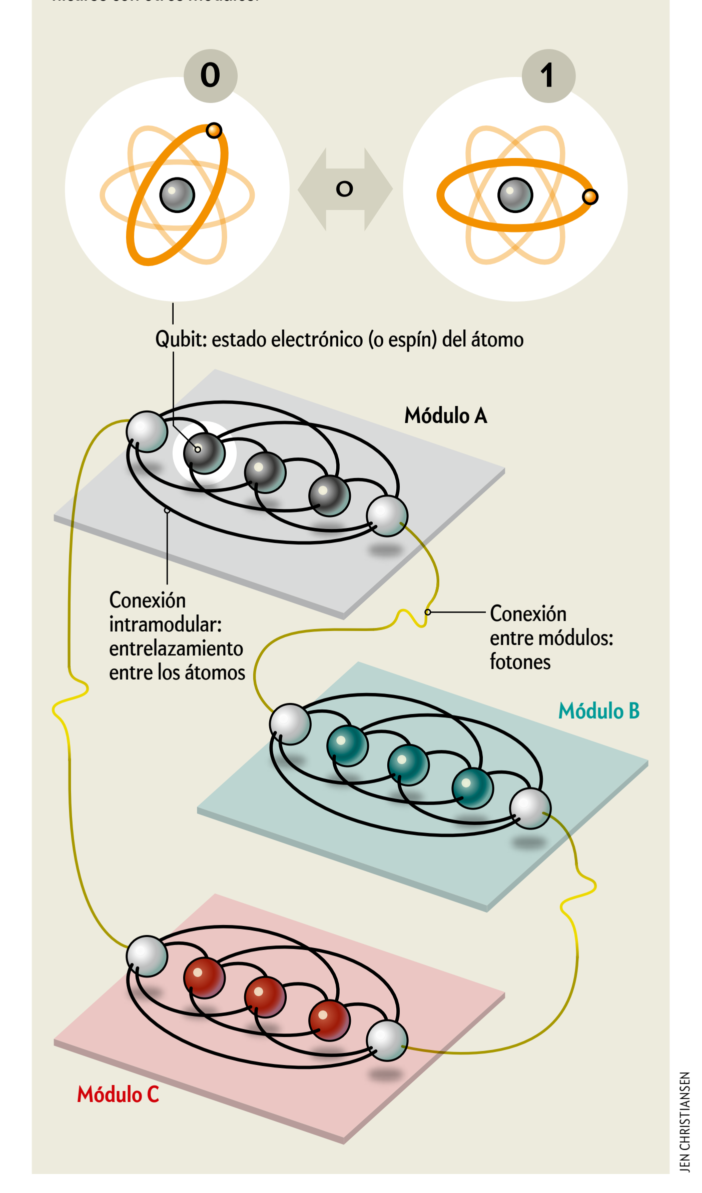
Propiedad cuántica 2: Entrelazamiento

Famosamente apodado por Einstein «espeluznante acción a distancia», el entrelazamiento permite generar un vínculo entre dos partículas de modo que, aunque ambas se encuentren separadas, las acciones ejecutadas sobre una repercutan de manera inmediata en la otra. En este esquema, las dos partículas entrelazadas se encuentran inicialmente en una superposición de estados (*izquierda*). Cuando una medición las fuerza a «elegir» un estado, ambas adoptarán siempre estados coordinados (en este ejemplo, espines opuestos). Al entrelazar múltiples qubits, una operación efectuada sobre uno de ellos afectará a todos los demás de forma instantánea, lo que permitiría un procesamiento en paralelo sin precedentes.



Qubits de iones atómicos

La forma más directa de construir un ordenador cuántico modular consiste en emplear átomos individuales a modo de qubits, de manera que los valores 0 o 1 (o sus superposiciones) se correspondan con distintos estados electrónicos (*arriba*). Aquí se muestran tres módulos —minicomputadores cuánticos formados por cinco iones cada uno— conectados de tal forma que se preserven las propiedades cuánticas de cada módulo. Los dos iones de los extremos (*blanco*) pueden emitir fotones para comunicarse con otros módulos.



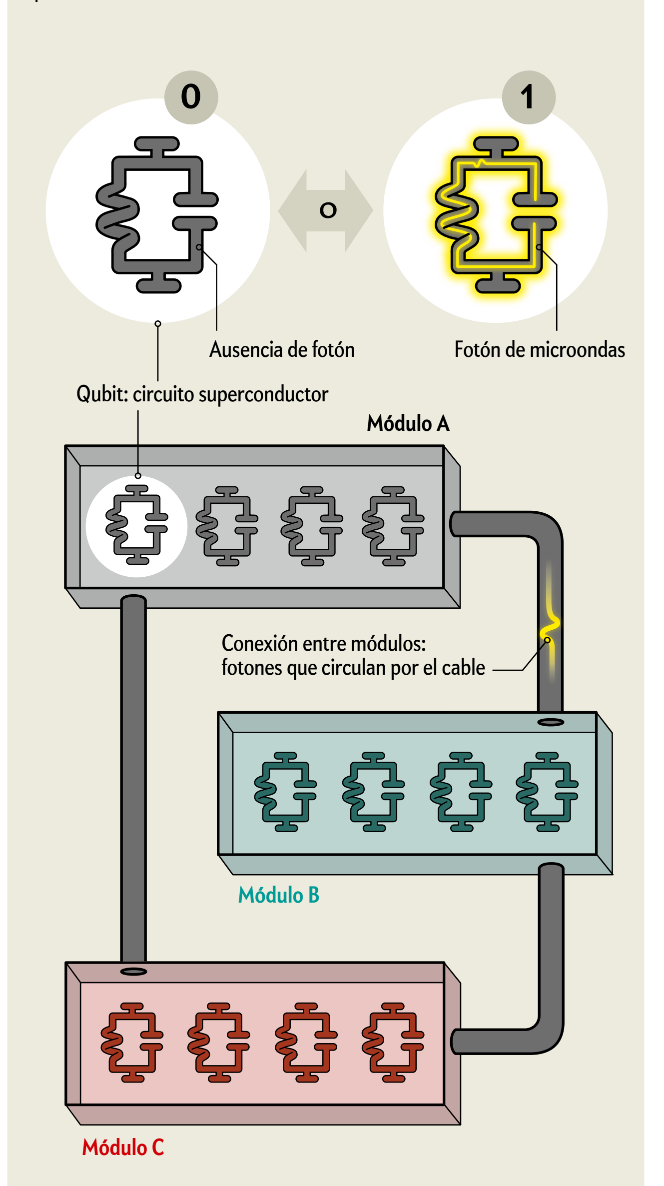
JEN CHRISTIANSEN

Se han explorado dos formas de conectar los módulos formados por estos cristales de iones entrelazados. En una de ellas, varios qubits son trasladados físicamente de un módulo a otro a través de un complejo laberinto de electrodos, un método propuesto en el año 2000 por Monroe, Wineland y David Kielpinski, por entonces en el NIST. Es posible lograr que los iones se desplacen sobre una onda electromagnética sin alterar su estado de espín. Cuando aterrizan en el segundo módulo, otros pulsos láser generan nuevos entrelazamientos. De esta manera, dos módulos con, por ejemplo, 50 qubits cada uno pasan a formar parte de un sistema de 100 qubits que pueden trabajar juntos, si bien con un enlace débil. No existe ningún límite teórico al número de módulos que pueden conectarse con esta técnica, conocida como «transporte de iones» (*ion shuttling*).

Una de las dificultades de este método radica en el control de las trampas de iones, las cuales son complejas y constan de cientos o miles de electrodos situados en posiciones muy precisas. Para lograr que los iones naveguen por el laberinto de

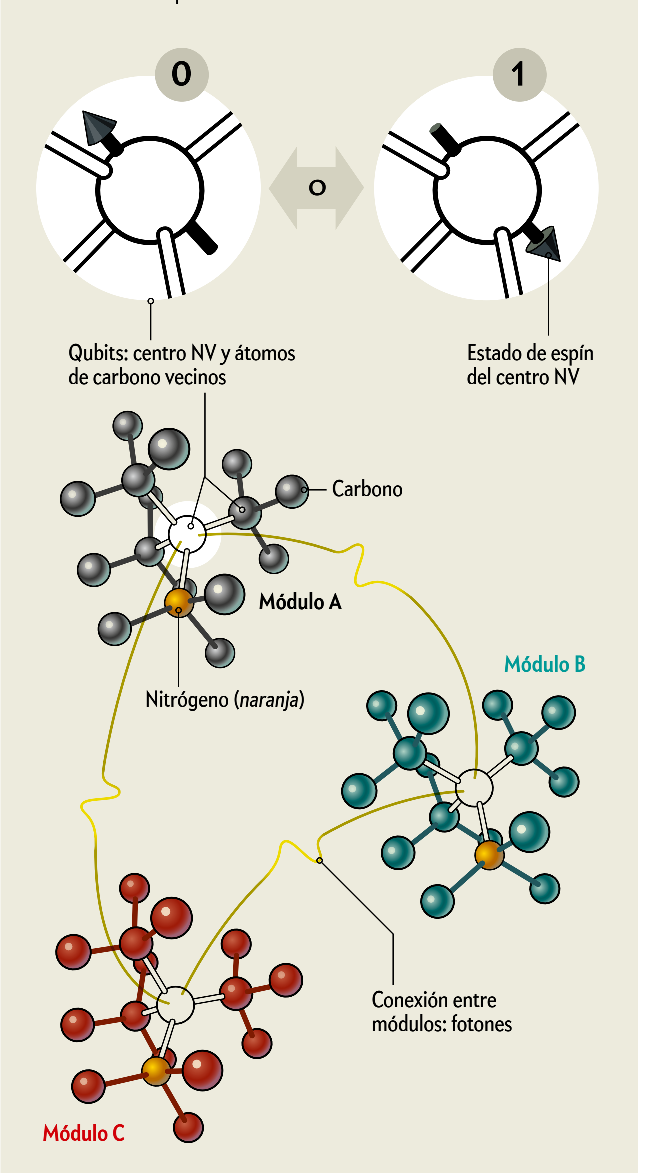
Qubits superconductores

Otra estrategia se basa en emplear «átomos artificiales» formados por circuitos superconductores. Los valores 0 o 1 se corresponden con la presencia o ausencia de un fotón de microondas, o bien con los estados de una corriente oscilante que recorre el circuito. En el interior de cada módulo, los qubits pueden entrelazarse directamente entre sí mediante fotones atrapados. A su vez, estos pueden enviarse a lo largo de cables para conectar unos módulos con otros.



Qubits de espín de estado sólido

Una tercera opción consiste en crear qubits a partir de los defectos en un material. En una red de diamante, si uno de los átomos de carbono se reemplaza por uno de nitrógeno, y un sitio vecino se deja vacante, la impureza recibe el nombre de centro nitrógeno-vacante (NV). Este y los átomos de carbono vecinos se convierten todos ellos en qubits, cuyos estados de espín representan unos y ceros. Cada grupo de impurezas en la red de diamante constituye un módulo independiente que puede conectarse a otros mediante fotones ópticos entrelazados.



electrodos, hemos de poder manipular cada uno de los voltajes de estos. Hoy en día, los Laboratorios Nacionales Sandia y Honeywell International están realizando notables esfuerzos para fabricar electrodos para trampas de iones a partir de silicio u otros materiales semiconductores.

El segundo método para conectar módulos de qubits iónicos no necesita mover los átomos. En su lugar, se emplean láseres para inducir en los iones la emisión de fotones entrelazados con los átomos, los cuales pueden transmitir el entrelazamiento entre módulos. Este tipo de interfaz fotónica tiene su origen en ideas iniciadas hace casi 20 años por investigadores de Innsbruck, Caltech y Harvard, y demostradas hace diez por Monroe.

La conexión fotónica presenta una gran ventaja: permite enlazar memorias cuánticas muy alejadas y puede aplicarse a otros tipos de qubit, como átomos neutros, qubits superconductores o semiconductores. Asimismo, es posible aumentar la escala de la conexión fotónica entre módulos mediante redes de fibra óptica e interruptores que nos permitan reconfigurar qué qubits han de ser entrelazados. Su principal desventaja reside en que la conexión entre qubits y fotones suele ser muy ineficiente, pues requiere capturar y guiar los fotones, lo que puede obligar a realizar numerosos intentos para establecer la conexión. Hasta el momento, los mejores resultados han operado a un ritmo de unas diez conexiones entrelazadas por segundo. Con todo, las previsibles mejoras tecnológicas deberían permitir elevar dicha tasa en varios órdenes de magnitud.

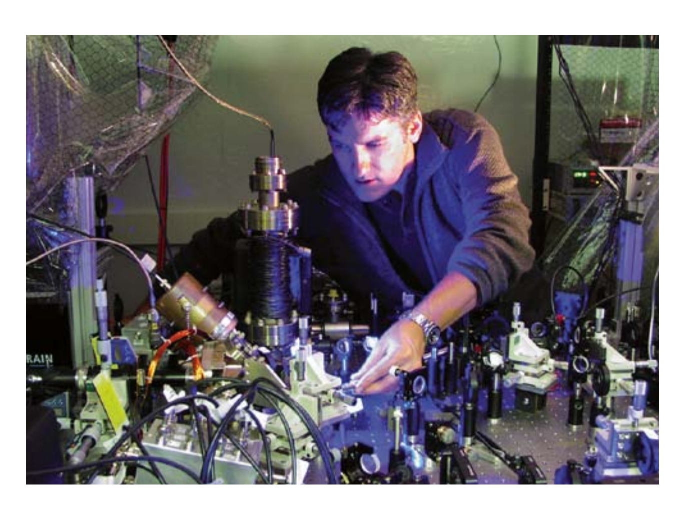
QUBITS SUPERCONDUCTORES

Puede que los átomos proporcionen los qubits más naturales, pero controlarlos y aumentar la escala del sistema es difícil. Una estrategia alternativa consiste en crear «átomos artificiales» mediante circuitos de material superconductor. Aunque estos dispositivos contienen un gran número de átomos, pueden comportarse como qubits sencillos y controlables. En ellos, los estados 0 o 1 se corresponden con la presencia o ausencia de un único fotón de microondas, o bien con el sentido horario o antihorario de una corriente eléctrica que recorre el circuito.

Tales circuitos cuentan con varias ventajas. Por un lado, sus propiedades pueden diseñarse a medida y es posible producirlos en masa con las mismas técnicas de fabricación de los circuitos integrados tradicionales. Pero, sobre todo, cuando operan a temperaturas cercanas al cero absoluto, pueden subsistir en un estado de superposición durante un tiempo suficiente para servir como qubits robustos. En los últimos 15 años, la vida media de estos sistemas se ha multiplicado por más de un millón.

Durante la última década, la investigación en circuitos cuánticos superconductores ha progresado con rapidez y ha permitido demostrar que poseen las características necesarias para construir un ordenador cuántico. Hoy, varios laboratorios de investigación y algunas empresas, como Google e IBM, ya pueden manipular y entrelazar varios qubits semiconductores. Gracias a las técnicas conocidas como electrodinámica cuántica de circuitos, iniciadas por uno de nosotros (Schoelkopf), Michael H. Devoret y Steve Grivin, ambos de Yale, es también posible entrelazar múltiples qubits a grandes distancias usando líneas de transmisión superconductoras.

Los dispositivos superconductores se prestan de forma natural a una arquitectura modular. Podemos establecer conexiones entre varios módulos situados en el interior de un gran dispositivo criogénico mediante cables superconductores y aparatos de medida, y, al mismo tiempo, reducir la interferencia y la interacción entre módulos protegiéndolos unos de otros. Para generar el entrelazamiento entre ellos, varios investigadores de Yale, el instituto JILA de la Universidad de Colorado en Boulder, la Universidad de California en Berkeley y otros lugares han desarrollado dispositivos superconductores especiales para efectuar mediciones cuánticas.



EN EL LABORATORIO: Uno de los autores, Christopher R. Monroe, emplea láseres para manipular qubits formados por iones atómicos.

CORTESÍA DE KATHERINE MONROE

El enfoque modular con qubits superconductores goza de varios atractivos. En lugar de construir y poner a prueba un circuito gigantesco, solo necesitamos producir en masa y calibrar los módulos más sencillos para, después, ir aumentando la complejidad del conjunto módulo a módulo. Aquellos defectuosos pueden ser eliminados o ignorados, y sus conexiones mutuas pueden reconfigurarse para crear diferentes arquitecturas. Otra línea de investigación persigue desarrollar transductores cuánticos de microondas a frecuencias ópticas, a fin de conectar módulos lejanos mediante fibra óptica y crear redes cuánticas de largo alcance o computadores cuánticos distribuidos.

QUIBITS DE ESPÍN DE ESTADO SÓLIDO

Por último, un tercer tipo de qubit codifica la información en los estados de espín de ciertos materiales. Aunque existen varios modelos, uno especialmente prometedor y que ha sido investigado por uno de nosotros (Lukin) genera los qubits a partir de los defectos presentes en algunos cristales. Uno de ellos es una red de diamante, en la que un átomo de carbono ha sido reemplazado por uno de nitrógeno y uno de los sitios vecinos se deja vacío: una impureza conocida como centro nitrógeno-vacante (NV). Con pulsos electromagnéticos es posible controlar el espín electrónico de esta impureza, la cual se comporta como un átomo. En un método propuesto por Lukin y sus colaboradores, el centro NV reacciona ante el espín nuclear de los átomos de carbono más cercanos, con lo que crea un grupo de qubits vecinos generado a partir de las interacciones magnéticas entre las partículas. No obstante, dado que la impureza NV tiene siempre un número limitado de vecinos de carbono cercanos, la cantidad de qubits por módulo se limita a menos de una docena.

Para aumentar la escala del sistema resulta necesario conectar varios módulos NV. Si los qubits están en diferentes redes cristalinas, es posible vincularlos haciendo que cada uno emita un fotón y, después, midiendo dichos fotones. En caso de que existan varias impurezas NV en un mismo cristal, también podemos conectarlas por medio de fonones, los cuantos de vibración de la red cristalina.

Una propiedad notable es que, aunque en general resulta difícil manipular la información codificada en qubits de centro NV, a menudo podemos hacerlo a temperatura ambiente. Las técnicas para observar centros NV individuales, concebidas en la pasada década por Jörg Wrachtrup, de la Universidad de Stuttgart, y Fedor Jelezko, hoy en la de Ulm, han permitido trabajar con qubits de espín electrónico individuales. Un equipo liderado por David Awschalom, de la Universidad de Chicago, ha conseguido manipular estos qubits en escalas de tiempo de nanosegundos, lo que resulta equiparable a la velocidad de los procesadores clásicos modernos.

En fecha reciente, Ronald Hanson y sus colaboradores de la Universidad de Delft han logrado entrelazar impurezas NV individuales a distancias de más de un kilómetro empleando para ello fotones entrelazados, una técnica similar al método fotónico para conectar iones que describíamos más arriba. Hoy por hoy, este procedimiento no resulta muy eficiente (en los experimentos de Delft, los vínculos por entrelazamiento se establecen a un ritmo de unos pocos por hora), pero hace poco se han desarrollado varias técnicas en Harvard y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts para aumentar considerablemente la eficiencia mediante dispositivos ópticos nanométricos. Y, dado que ya contamos con los medios para crear varios qubits alrededor de un único defecto de la red de diamante, así como para almacenarlos durante más de un segundo en cristales ultrapuros, como los que fabrica la compañía Element Six, los centros NV ofrecen un enorme potencial para una arquitectura modular que permita construir ordenadores cuánticos cada vez mayores.

FUTURO CUÁNTICO

Tras más de veinte años de investigación y desarrollo, la comunidad ha conseguido poner a prueba todas estas estrategias modulares a pequeña escala. Ahora queda extenderlas a conglomerados mayores de qubits y módulos y comenzar a aplicarlas. En nuestra opinión, la meta está al alcance de la vista.

El futuro plantea un desafío emocionante. A medida que las máquinas cuánticas aumenten de tamaño, cada vez será más difícil controlarlas y verificar que el sistema completo se comporta de forma cuántica. Por suerte, la arquitectura modular nos permitirá comprobar y validar los módulos individuales y sus diversas interconexiones de manera independiente y sin perturbar el conjunto. En fecha reciente se han conseguido avances significativos en esta dirección.

Incluso a una escala relativamente modesta, los ordenadores cuánticos modulares darán lugar a aplicaciones únicas. Se postulan de forma natural como la espina dorsal de una futura «Internet cuántica», compuesta por pequeños procesadores cuánticos conectados mediante fotones ópticos entrelazados. Los computadores modulares podrían servir como estaciones repetidoras que extendiesen hasta distancias continentales el alcance de las comunicaciones cuánticas seguras, hoy limitado a unos 100 kilómetros debido a la pérdida de fotones en las fibras de telecomunicaciones tradicionales.

Ciertos elementos de las máquinas cuánticas modulares ya se están incorporando en algunos de los cronómetros más precisos del mundo, y se espera que su importancia crezca con la llegada de una nueva generación de relojes atómicos ópticos basados en átomos neutros e iones atómicos. Varios expertos han propuesto la creación de una red global de tales dispositivos, con el fin de conseguir una única escala internacional de tiempo: un «reloj mundial» que operaría con una estabilidad y precisión sin precedentes.

Una red cuántica en miniatura también podría servir como sensor de precisión de campos electromagnéticos y de temperaturas en sistemas químicos y biológicos complejos de escala nanométrica. Por ejemplo, los espines nucleares y electrónicos asociados a las impurezas de los materiales ya se han empleado para lograr imágenes por resonancia magnética con resolución atómica. La técnica podría usarse para obtener directamente imágenes de moléculas individuales. Ello supondría un gran avance en disciplinas como biología o ciencia de materiales, al tiempo que proporcionaría nuevas herramientas para el diagnóstico médico y el desarrollo de medicamentos.

Creemos que ha llegado el momento de dejar de preguntarnos si la computación cuántica llegará algún día y empezar a concentrarnos en su arquitectura a gran escala y en lo que será capaz de conseguir. Es cierto que no sabemos cómo cambiarán el mundo los ordenadores cuánticos, pero, gracias a las redes modulares de computación cuántica, tal vez pronto comencemos a averiguarlo. IyC

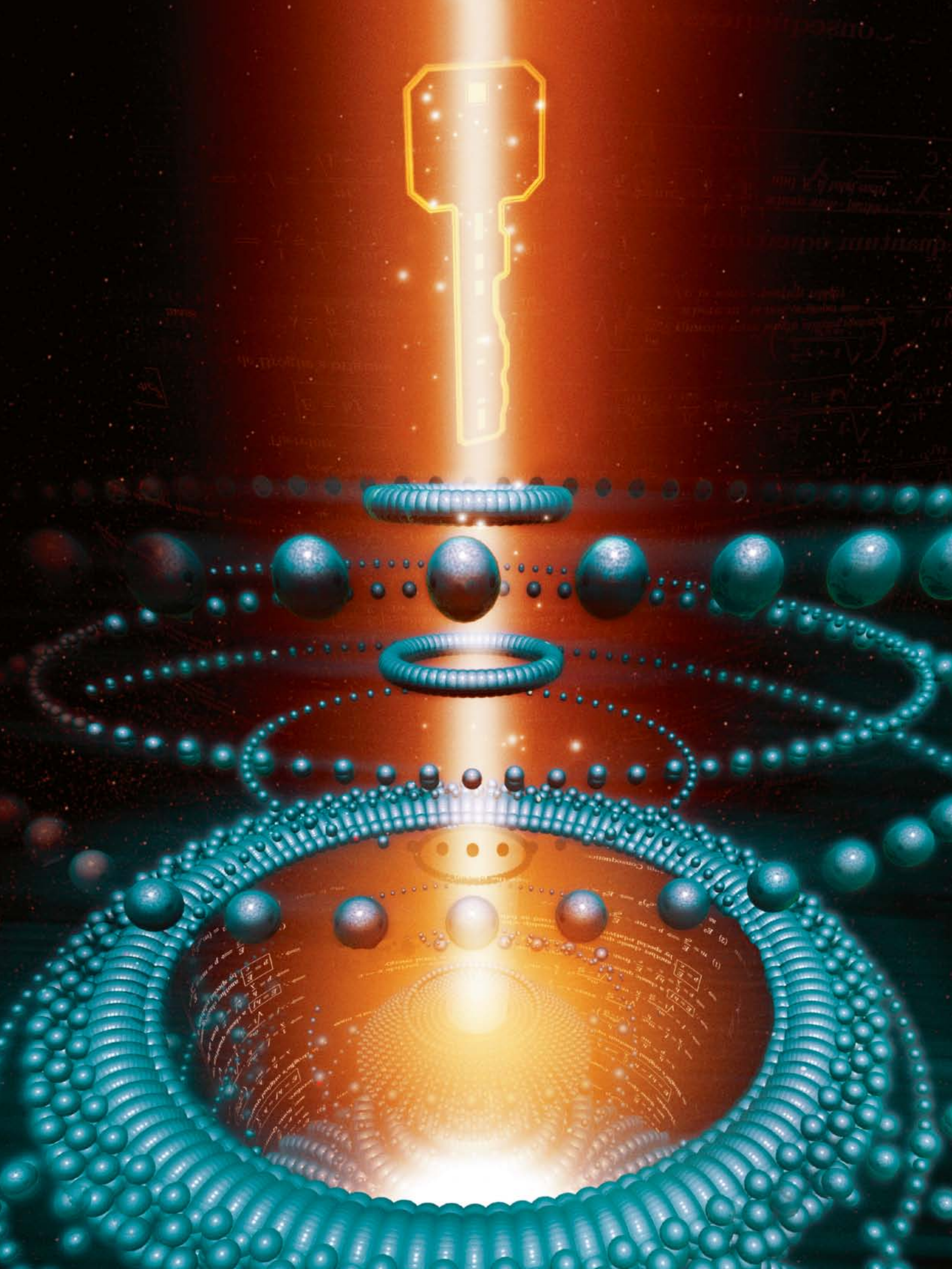
Vínculos comerciales: *Christopher R. Monroe es cofundador y coautor de propiedad intelectual de ionQ, una compañía dedicada al desarrollo de ordenadores cuánticos atómicos mediante los métodos que se describen en este artículo. Robert J. Schoelkopf es cofundador, accionista y autor de propiedad intelectual de Quantum Circuits, empresa que desarrolla circuitos superconductores para computación cuántica basados en las técnicas que aquí se discuten. Mikhail D. Lukin es cofundador, asesor y coautor de propiedad intelectual de Quantum Diamond Technologies, una compañía que aplica sensores cuánticos al diagnóstico médico y que usa las investigaciones expuestas en este artículo.*

PARA SABER MÁS

Scaling the ion trap quantum processor. C. Monroe y J. Kim en *Science*, vol. 339, págs. 1164-169, 8 de marzo de 2013.
Superconducting circuits for quantum information: An outlook. M. H. Devoret y R. J. Schoelkopf en *Science*, vol. 339, págs. 1169-1174, 8 de marzo de 2013.
Atom-like crystal defects: From quantum computers to biological sensors. Lilian Childress et al. en *Physics Today*, vol. 67, n.º 10, págs. 38-43, octubre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Procesamiento cuántico de la información. Antonio Acín en *IyC*, septiembre de 2006.
La edad de diamante de la espintrónica. David D. Awschalom, Ryan Epstein y Ronald Hanson en *IyC*, diciembre de 2007.
Computación cuántica con iones. Christopher R. Monroe y David J. Wineland en *IyC*, octubre de 2008.





CIBERSEGURIDAD

LA PRIVACIDAD EN LA ERA CUÁNTICA

Los ordenadores cuánticos dejarán obsoletos los métodos criptográficos actuales. ¿Qué ocurrirá entonces?

Tim Folger

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

Tim Folger escribe para *National Geographic, Discover* y otras publicaciones estadounidenses. Es también editor de la serie *The best american science and nature writing* («Los mejores escritos estadounidenses sobre ciencia y naturaleza»), una antología anual publicada por Houghton Mifflin Harcourt.



Una tarde de octubre, en una playa de Puerto Rico, dos científicos encontraron la solución a un problema que aún no existía. Corría el año 1979. Gilles Brassard, que acababa de obtener su doctorado en Cornell, estaba inmerso en las cálidas aguas del Caribe cuando alguien nadó hacia él. El desconocido se lanzó a explicarle una idea sobre cómo crear una moneda infalsificable. Dicho procedimiento, que había sido inventado varios años antes por un estudiante de doctorado de la Universidad de Columbia llamado Stephen Wiesner, implicaba engastar fotones (partículas de luz) en los billetes. Según las leyes de la mecánica cuántica, todo intento de medir o copiar los fotones alteraría de forma instantánea sus propiedades. Cada billete tendría su propia cadena de fotones: un número de serie cuántico imposible de replicar.

«Me pilló por sorpresa, pero lo escuché con cortesía», relata Brassard, hoy catedrático de sistemas de la información en la Universidad de Montreal. Aquella conversación, cuenta, le cambiaría la vida. Su interlocutor era Charles Bennett, y había reconocido a Brassard como uno de los asistentes a un congreso en el que ambos participaban. Aunque la idea de los billetes cuánticos les intrigaba a los dos, sabían que era técnicamente imposible de realizar: incluso hoy, nadie sabe cómo capturar, inmovilizar y almacenar en un trozo de papel partículas que se mueven a la velocidad de la luz.

«Desde entonces hemos progresado, pero aún estamos remotamente lejos de nada que pueda servir para fabricar billetes cuánticos», explica Brassard. «Pero aquel experimento mental marcó el punto de partida. Es un bello ejemplo de una idea que, siendo completamente disparatada en cuanto a sus aplicaciones prácticas, resulta ser trascendental. Fue a raíz de aquel planteamiento que Bennett y yo concebimos lo que hoy se conoce como distribución cuántica de claves.»

La distribución cuántica de claves constituye una técnica para codificar y transmitir información utilizando fotones. En principio, proporciona una forma de criptografía inviolable. Tras aquel día en la playa, Bennett y Brassard comenzaron una colaboración que duraría cinco años y que conduciría al primer método criptográfico de la historia que depende de las leyes de la física y no de la complejidad matemática. Cuando Bennett y Brassard publicaron finalmente su trabajo, en 1984, fueron pocos los investigadores que se tomaron la idea en serio o que siquiera se percataron de ella. «Se consideraba un problema anecdótico, y eso por parte de los que le prestaban alguna atención. Creo que nosotros mismos tampoco nos lo tomábamos muy en serio», comenta Brassard.

Hoy la situación es otra. Hace treinta años, prácticamente los únicos que empleaban técnicas criptográficas eran los servicios de inteligencia gubernamentales. Pero, en la actualidad, dichas técnicas resultan esenciales para cualquiera de las transacciones que se realizan por Internet. Cada vez que alguien introduce su contraseña o el número de su tarjeta de crédito, complejos programas integrados en los navegadores trabajan en la sombra para mantener la información a salvo de delincuentes. «Es una tecnología que todos necesitamos pero de la que nadie es consciente», señala Vadim Makarov, investigador del Instituto de Computación Cuántica de la Universidad de Waterloo, en Ontario. «Simplemente funciona.»

Sin embargo, puede que pronto deje de funcionar. Casi todos los esquemas de cifrado usados en la actualidad se volverán obsoletos con la llegada de los ordenadores cuánticos. Y, aunque por ahora nadie dispone de un ordenador cuántico funcional, investigadores del ámbito académico, empresarial y gubernamental están intentando diseñar uno. Entre los documentos hechos públicos en 2013 por Edward Snowden se encontraba la descripción de un proyecto secreto de la Agencia Nacional de Seguridad (NSA) estadounidense para invertir 79,7 millones de dólares en la construcción de un ordenador cuántico. «Es difícil asegurar que no habrá uno dentro de 10 o 15 años», opina Ray Newell, físico del Laboratorio Nacional de Los Álamos.

Si eso llegase a ocurrir, la manera más efectiva de contrarrestarlos podría ser otro sortilegio cuántico: redes criptográficas basadas en el esquema que Bennett y Brassard concibieron hace

EN SÍNTESIS

Los métodos criptográficos se han convertido en un elemento vital del comercio y la comunicación diarias. Su seguridad se basa en que resultan muy difíciles de romper con un ordenador tradicional.

Los futuros ordenadores cuánticos, sin embargo, podrán explotar las propiedades del mundo subatómico para probar de manera simultánea las distintas maneras de descifrar una clave criptográfica.

Por el momento nadie ha conseguido construir un ordenador cuántico funcional, pero Gobiernos, académicos y compañías privadas ya están en ello. Algunos expertos creen que podrían llegar en tan solo diez años.

En estos momentos tiene lugar una carrera por desarrollar técnicas viables de criptografía cuántica. Esta se sirve de la incertidumbre subatómica para generar códigos casi indescifrables.

32 años. El cifrado cuántico constituye un método que explota las extrañas propiedades de los fotones para codificar las transmisiones. Hasta la fecha, su implementación está resultando más sencilla que la construcción de un ordenador cuántico. De hecho, algunos proyectos de criptografía cuántica ya están en marcha. Sin embargo, hay un problema: con toda probabilidad, reemplazar los sistemas mundiales de cifrado por sus versiones cuánticas requerirá más tiempo que desarrollar ordenadores cuánticos. «Si pensamos que el problema puede que aparezca dentro de 10 o 15 años, deberíamos haber empezado a hacer esto ayer», asegura Newell. «Puede que ya sea demasiado tarde.»

GRANDES NÚMEROS

Tras los cómodos clics de ratón o toques de pantalla con los que realizamos transacciones comerciales en Internet, hay un elegante y complejo andamiaje matemático. Este comprende dos tipos de algoritmos de cifrado. Por un lado, la criptografía simétrica, en la que la misma clave secreta se usa para cifrar y descifrar los mensajes. Por otro, la criptografía asimétrica, la cual emplea una clave para codificar el mensaje y otra distinta para descodificarlo. Todo intercambio seguro de información en Internet requiere el uso de ambos métodos.

Una sesión típica entre el ordenador de un comprador y el servidor web de un proveedor empieza con la creación de una clave simétrica. Esta será compartida por el cliente y el vendedor para codificar el número de la tarjeta de crédito y otros datos. Una clave extraordinariamente simple consistiría, por ejemplo, en especificar que cada uno de los dígitos del número de la tarjeta de crédito se multiplica por 3 (por supuesto, las claves reales son mucho más complejas). Una vez creada dicha clave, el navegador del cliente la intercambia con el servidor del proveedor. Pero ¿cómo lograr que la clave se mantenga privada durante ese intercambio inicial? Para ello, una segunda capa de seguridad, basada en una clave asimétrica, cifra la clave simétrica.

Desarrollada independientemente en los años setenta por los servicios secretos británicos y por investigadores académicos, la criptografía asimétrica usa dos claves: una pública y otra privada. Durante una compra en línea, el servidor del vendedor envía su clave pública al ordenador del cliente. Este utiliza después esa clave pública (la cual está a disposición de los demás clientes) para cifrar la clave simétrica compartida. Tras recibir la clave simétrica cifrada, el servidor del vendedor la descifra con su clave privada, que nadie más posee. Por último, una vez que la clave simétrica ha sido compartida de forma segura, esta se emplea para cifrar el resto de la transacción (*véase el recuadro* «Así funciona la criptografía (por ahora)»).

Las claves pública y privada empleadas en la criptografía asimétrica se derivan de la descomposición en factores primos de números muy grandes. La clave pública es un número que se obtiene multiplicando dos primos muy grandes entre sí. La privada consiste en los dos números primos que factorizan la clave pública. Incluso un niño puede multiplicar números primos, pero la operación inversa (encontrar la descomposición en factores primos de un número muy grande) supone todo un reto hasta para los ordenadores más potentes. Los números usados en el cifrado asimétrico tienen una longitud típica de cientos de dígitos. Newell explica que hallar los factores primos de un número tan grande es como intentar separar los colores de una lata de pintura: «Mezclar pintura de dos colores es trivial; volver a separarla, no».

HOY

Así funciona la criptografía (por ahora)

Cada vez que usted efectúa una compra en línea, su navegador y el sitio web del vendedor intercambian un código secreto: una clave que se usa para cifrar la información transmitida. Dado que ambos emplean la misma clave, el proceso se conoce como cifrado simétrico. Sin embargo, para poder intercambiar la clave de forma segura, ambas partes necesitan utilizar otro tipo de cifrado, denominado asimétrico. Hoy esta técnica se considera segura, pero quedará obsoleta con la llegada de los ordenadores cuánticos.

Criptografía simétrica

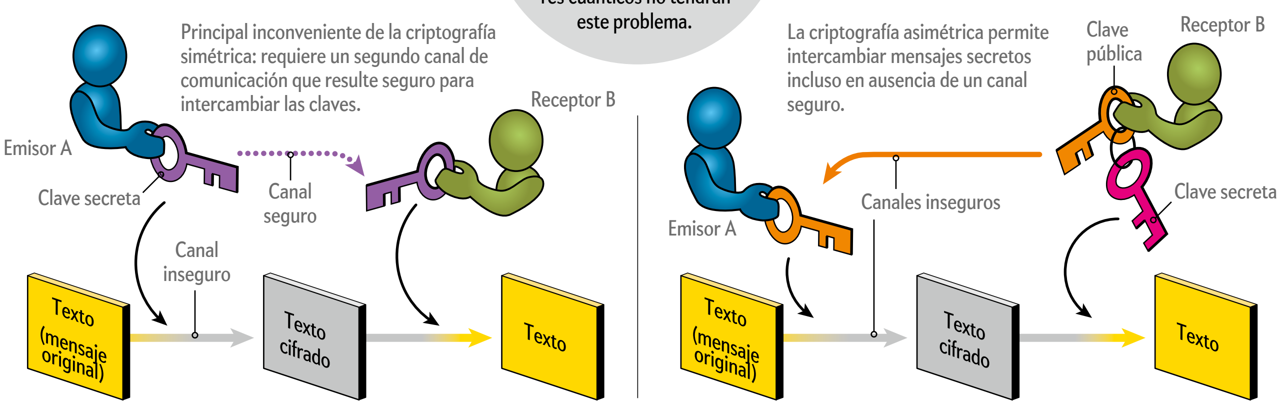
Cuando dos dispositivos deben comunicarse a través de un canal inseguro, el emisor, A, cifra la información con una clave antes de enviarla al receptor, B. Que el texto sea interceptado no supone ningún riesgo, ya que, sin conocer la clave, el mensaje es un galimatías. Sin embargo, B sí podrá leerlo, ya que A le ha enviado previamente la clave a través de un canal seguro.

Vulnerabilidades

La criptografía asimétrica funciona porque, para un ordenador tradicional, resulta muy difícil factorizar números enteros grandes. Los ordenadores cuánticos no tendrán este problema.

Criptografía asimétrica

B selecciona un par de claves: una explica cómo cifrar el mensaje; la otra, cómo descifrarlo. B hace pública la clave para codificar el mensaje, la cual puede ser usada por A para cifrar la información. Cuando B reciba el mensaje, podrá leerlo gracias a la clave privada, que solo él posee.



JEN CHRISTIANSEN

El método de criptografía asimétrica más extendido es el RSA, el cual debe su nombre a las iniciales de Ron Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman, quienes lo desarrollaron a finales de los años setenta en el Instituto de Tecnológía de Massachusetts [*véase* «Comunicaciones secretas», por Martin Gardner; Investigación y Ciencia, octubre de 1977]. La longitud de las claves empleadas ha ido creciendo con el tiempo para mantenerlas a salvo de espías cada vez más habilidosos y con mejores ordenadores. Hoy, las claves asimétricas tienen 1024 bits, pero incluso dejando de lado los ordenadores cuánticos, puede que eso no baste para evitar ataques en el futuro. «El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología [NIST] recomienda pasar a claves RSA de 2048 bits», apunta Richard Hughes, físico de Los Álamos. «Pero el aumento en la longitud de las claves tiene un coste en el rendimiento. Ese molesto intervalo de tiempo tras pulsar el botón de "comprar", en el que el proceso se queda colgado por un momento, es la criptografía de clave pública en acción. Y, a mayor longitud de la clave, mayor la demora.» El problema es que nuestros ordenadores no están mejorando al mismo ritmo que los algoritmos descodificadores, por lo que cada vez se necesitan claves más largas. «Eso supone un problema por distintos motivos», explica Hughes. «Si tienes un sistema que precisa muchas sesiones simultáneas de clave pública, o si has de gestionar algo como una red eléctrica, no te puedes permitir ese tipo de demoras.»

Pero incluso la mejora recomendada por el NIST quedaría obsoleta ante un ordenador cuántico. «Creo que hay un 50 por ciento de posibilidades de que un ordenador cuántico rompa cifrados RSA de 2048 bits antes de 2030», conjetura Michele Mosca, cofundador del Instituto de Computación Cuántica. «Hemos visto muchos avances en los últimos cinco años que nos hacen pensar que deberíamos estar preparados ante la posibilidad de que lleguen los ordenadores cuánticos», comenta Donna Dodson, consejera jefa de ciberseguridad del NIST. «Creemos que es probable.»

DE CÓDIGOS Y QUBITS

¿Qué hace tan potente a un ordenador cuántico? En una computadora tradicional, un bit solo puede adoptar uno de dos valores posibles: 0 o 1. Un ordenador cuántico, sin embargo, saca partido del extraño comportamiento del mundo subatómico, en el que las partículas pueden encontrarse en varios estados al mismo tiempo. Al igual que el célebre gato de Schrödinger, que está vivo y muerto a la vez hasta que alguien abre la caja para observarlo, un bit cuántico de información, o qubit, puede valer 0 y 1 simultáneamente. En la práctica, un qubit podría consistir en un electrón que se encuentra al mismo tiempo en dos posibles estados de espín. De esta manera, un ordenador cuántico con 1000 qubits contendría 2^{1000} estados posibles, una cifra que excede de largo el número de partículas que hay en el universo. Eso no implica que un ordenador cuántico pueda almacenar cantidades ilimitadas de datos, ya que cualquier intento de observar los qubits provocaría inmediatamente que estos adoptasen un solo valor de 1000 bits. Sin embargo, con una programación inteligente, sería posible aprovechar la vasta cantidad de estados que pueden adoptar los qubits cuando no son observados para realizar cálculos impracticables en un ordenador tradicional.

En 1994, el matemático Peter Shor, a la sazón en los Laboratorios AT&T Bell, demostró que un ordenador cuántico podría factorizar con rapidez los grandes números empleados en el método RSA, el que protege el intercambio de claves simétricas durante las transacciones por Internet. Con ello, Shor escribió el primer programa para un ordenador cuántico. Al contrario que en una computadora normal, donde los cálculos se suceden paso a paso, un ordenador cuántico realiza las operaciones simultáneamente. Shor explotó esta propiedad. «El algoritmo de Shor reventaría el cifrado RSA», explica Mosca.

Por su parte, los métodos criptográficos simétricos —de los que el más común es el llamado Estándares de Cifrado Avanzado (AES), aprobado por el NIST en 2001— seguirían siendo seguros con ordenadores cuánticos. Ello se debe a que los programas de cifrado simétrico de tipo AES no usan números primos. En su lugar, las claves simétricas son cadenas de bits, típicamente 128, generados de forma aleatoria. Eso significa que hay 2^{128} elecciones posibles de clave, por lo que un espía tendría que probar con billones de billones de billones de posibilidades. El ordenador más rápido del mundo, el Tianhe-2 chino, capaz de realizar 33.800 billones de operaciones por segundo, necesitaría un billón de años para probar todas las opciones. Ni siquiera un ordenador cuántico estaría a la altura

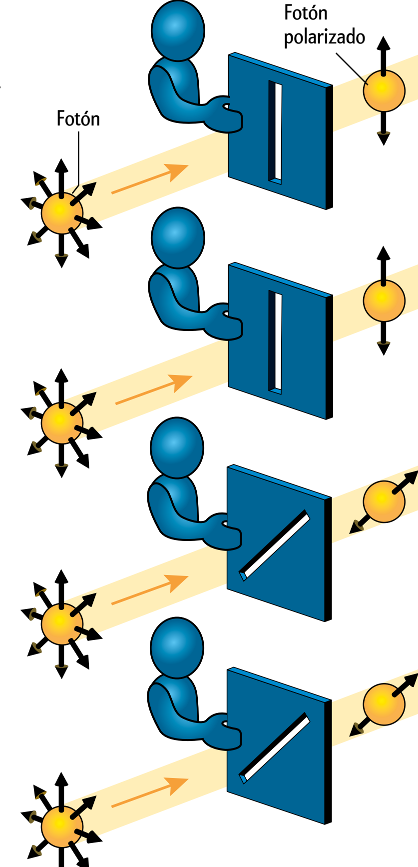
JEN CHRISTIANSEN

MAÑANA

El futuro cuántico de la criptografía

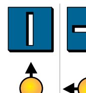
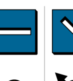
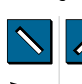
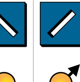
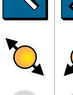
La distribución cuántica de claves proporciona una forma segura de intercambiar claves con fotones polarizados. Todo intento de medir el estado de los fotones durante la travesía modificará la polarización de algunos de ellos, por lo que el emisor y el receptor sabrán que el mensaje ha sido interceptado.

El emisor tiene cuatro filtros de polarización. Cada bit (codificado en la polarización del fotón) queda registrado cuando se emite.



Emisión y recepción de fotones polarizados

El emisor (*azul*) envía varios fotones, cada uno de los cuales pasa a través de uno de cuatro filtros de polarización. A cada filtro —es decir, a cada posible dirección de polarización— se le asigna el valor 0 o 1 (*abajo*). El emisor anota el valor del bit asociado a cada fotón. El receptor (*verde*) solo puede determinar el valor del bit de cada fotón después de que este atraviese uno de los filtros de llegada.

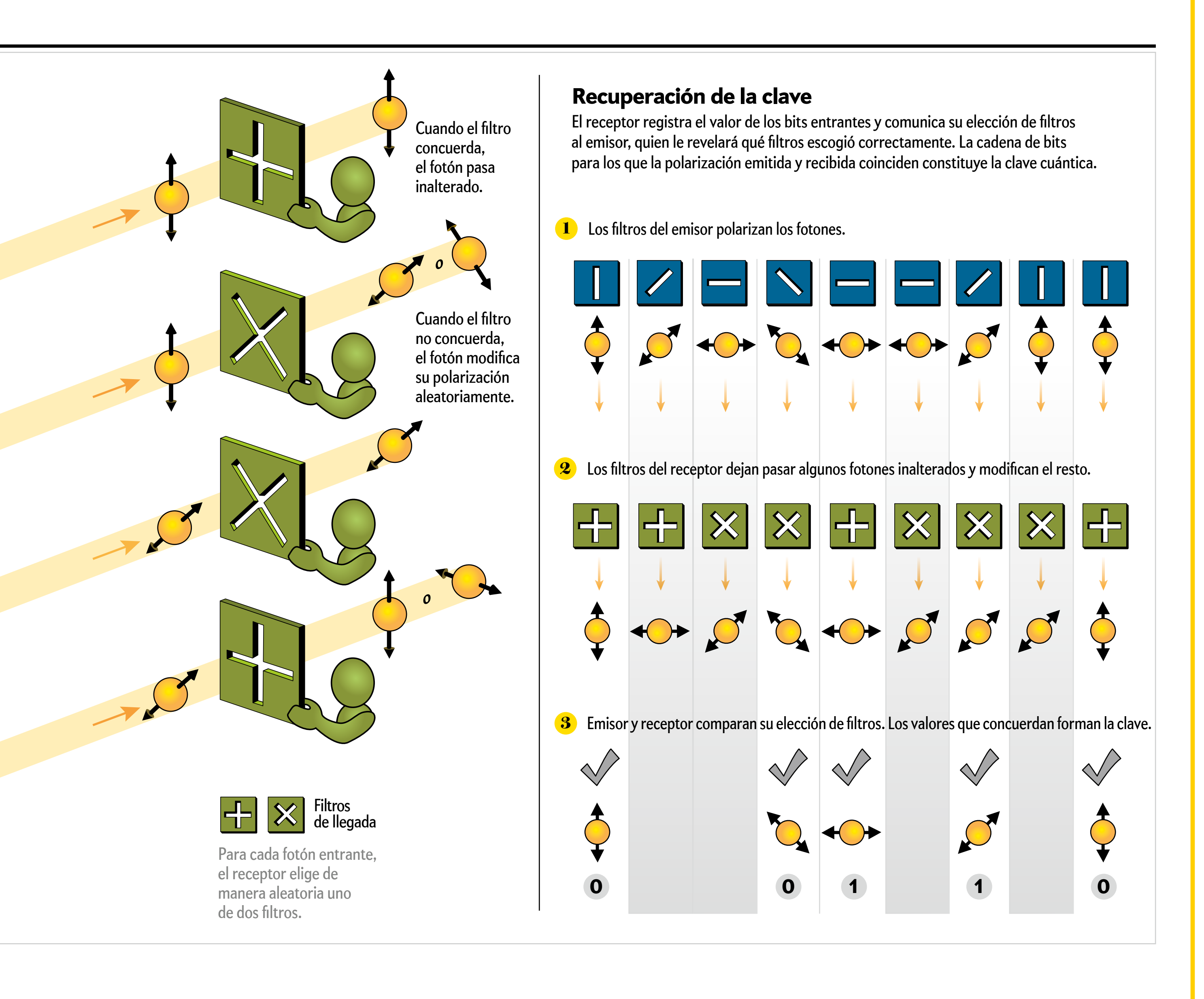
de tal complejidad. Pero esas claves simétricas han de intercambiarse previamente de forma segura mediante esquemas asimétricos, de tipo RSA, los cuales sí son vulnerables al método de factorización de Shor.

Pero, para romper el cifrado RSA, el programa de Shor necesita un ordenador cuántico en el que ejecutarse. Mosca predice que, antes de que finalice el año, un buen número de laboratorios alrededor del mundo habrán conseguido desarrollar sistemas rudimentarios de unas cuantas decenas de qubits. «Para factorizar una clave RSA de 2048 bits se necesitan al menos 2000 qubits», apunta. El salto de unas decenas a miles de qubits podría tardar una década en llegar, pero Mosca no ve ningún obstáculo insalvable: «Ya tenemos casi todo lo que, en principio, hace falta para construir un ordenador cuántico completo, solo que aún no necesariamente en el mismo lugar, al mismo tiempo y en un sistema que pueda hacerse cada vez mayor».

REDES CUÁNTICAS

La buena noticia es que el progreso de las técnicas de cifrado cuántico ha sido hasta ahora más rápido que el desarrollo de un ordenador cuántico funcional. La criptografía cuántica comenzó a despegar en 1991, cuando Artur Ekert, físico de la Universidad de Oxford, publicó un artículo hoy célebre sobre criptografía cuántica en la prestigiosa *Physical Review Letters*. Ekert, que en aquel momento no conocía el trabajo de Bennett y Brassard, concibió una manera alternativa de aprovechar las propiedades de la mecánica cuántica para cifrar información. Su trabajo confirió un nuevo reconocimiento a la idea de Bennett y Brassard, que en la práctica resulta más útil que la de Ekert.

Con todo, no fue hasta principios de este siglo cuando las técnicas de cifrado cuántico salieron de los laboratorios y comenzaron a comercializarse. Para entonces los investigadores ya habían encontrado formas de enfriar los detectores de fotones —el componente esencial y el más caro de todo dispositivo de criptografía cuántica— con corrientes eléctricas en lugar de con nitrógeno. «Cuando comencé mi doctorado, en 1997, enfriábamos los detectores sumergiéndolos en nitrógeno líquido. Esto es factible en un laboratorio, pero no muy práctico para un centro de procesamiento de datos», señala Grégoire Ribordy, director ejecutivo de ID Quantique. Esta compañía suiza desarrolló en 2007 uno de los primeros sistemas comerciales de cifrado cuántico, que más tarde fue adquirido por el Gobierno suizo para proteger sus centros de datos. Desde entonces, la empresa ha prestado sus servicios a la banca suiza y trabaja actualmente con



Battelle Memorial Institute, una compañía con sede en Columbus, Ohio, para construir una red que algún día conecte sus oficinas centrales con las de una de sus filiales en Washington D.C.

En un día nublado de verano, Nino Walenta, físico de Battelle, me muestra uno de sus dispositivos criptográficos: «En esta estantería está todo lo que necesitamos para generar las claves y distribuirlas, incluidos los elementos de óptica cuántica», señala. Walenta se halla en un laboratorio del sótano, junto a un mueble de dos metros en una de cuyas baldas hay una caja de metal del tamaño de un maletín grande. Esa caja contiene la realización material del sistema de criptografía cuántica propuesto hace más de tres décadas por Bennett y Brassard.



ENRUTADOR CUÁNTICO: El dispositivo QKarD, desarrollado por investigadores del Laboratorio Nacional de Los Álamos, permitiría a una red de ordenadores, teléfonos móviles y otros aparatos intercambiar claves cuánticas a través de un servidor central seguro.

CORTESÍA DEL LABORATORIO NACIONAL DE LOS ÁLAMOS

El equipo incluye un pequeño diodo láser, similar a los de los reproductores de DVD o los escáneres de códigos de barras, que lanza pulsos de luz a un filtro de cristal. Este absorbe casi todos los fotones, lo que, en la práctica, permite que los que pasen lo hagan de uno en uno. Después, son polarizados a lo largo de una de dos direcciones posibles, cada una de las cuales corresponde a uno de los valores del bit: 0 o 1. Una vez filtrados y polarizados, los fotones se convierten en la base de una clave secreta que se transmite al receptor a lo largo de un cable de fibra óptica. Por último, el receptor cuenta con su propio equipo que descodifica la clave midiendo la polarización de los fotones.

Al contrario que las claves secretas tradicionales, las secuencias de bits en forma de fotones polarizados proporcionan un cifrado casi imposible de romper. Todo intento de interceptar los fotones modificaría la polarización de algunos de ellos, lo que alteraría el valor de los bits correspondientes. Comparando algunas partes de la clave, el emisor y receptor pueden comprobar si los fotones transferidos coinciden con los originales. Ante cualquier indicio de manipulación, la clave se desecha y el proceso comienza de nuevo. «Hoy en día se emplean a menudo las mismas claves durante años», explica Walenta. «Pero la distribución cuántica de claves nos permite cambiar de clave cada segundo o cada minuto, por eso es tan segura.»

Battelle ya ha desplegado una red de criptografía cuántica para intercambiar informes financieros y otros datos confidenciales entre su sede central en Columbus y una de sus plantas de producción en Dublin, también en Ohio. La red consiste en un circuito de 110 kilómetros de fibra que conecta ambas instalaciones. Esa distancia marca el límite de aplicabilidad de la técnica: en recorridos mayores, la señal se deteriora a causa de la absorción de fotones por el cable de fibra óptica.

A fin de salvar ese inconveniente y poder extender algún día la red, los investigadores de Battelle trabajan con ID Quantique para desplegar los llamados «nodos de confianza», cajas repetidoras que recibirán y retransmitirán las comunicaciones cuánticas. Los nodos estarán sellados y aislados del exterior para proteger los sensibles detectores de fotones de su interior, que tienen que mantenerse a 40 grados Celsius bajo cero. Si alguien intentara penetrar en uno de los nodos, el dispositivo en su interior se apagaría y borraría los datos. «La generación de claves quedaría interrumpida», asegura Don Hayford, físico que lidera la investigación en criptografía cuántica en Battelle.

Si la cadena de nodos de confianza funciona sin percances, explica Hayford, la técnica podrá desplegarse a mayor escala. Me pasa un folleto con un mapa que ilustra una futura red cuántica extendida por amplias regiones de Estados Unidos. «Esta es nuestra visión de la red cuántica que protegería todos los sistemas bancarios de la Reserva Federal», señala. «Para atravesar el país son necesarios unos 75 nodos. Pueden parecer muchos, pero con cualquier fibra óptica al uso hay que instalar repetidores a intervalos parecidos.»

El Gobierno chino ha abrazado una técnica similar. Ha comenzado a construir una red de 2000 kilómetros entre Shanghái y Pekín para uso de organismos gubernamentales y financieros. Sin embargo, aunque el proyecto concebido por Hayford y el que ya está en camino en China pueden servir para proteger a bancos y otras organizaciones que dispongan de redes privadas, no serían prácticos para Internet. Los nodos de confianza se conectan uno con otro de manera lineal, y no en una red ramificada en la que cada máquina puede comunicarse fácilmente con cualquier otra. Para Beth Nordholt, física de Los Álamos recientemente retirada, esas conexiones que van de un punto a otro recuerdan a los caóticos comienzos de la red telefónica de finales del siglo XIX, cuando gruesos y oscuros cables colgaban por las calles de las ciudades. «En aquellos tiempos necesitabas un cable por cada teléfono con el que quisieras hablar», relata. «Eso complica la construcción de una red a gran escala.»

Nordholt, su marido Richard Hughes y sus colegas de Los Álamos Newell y Glen Peterson trabajan para que la técnica pueda aplicarse a distintas escalas. A tal fin han desarrollado un dispositivo del tamaño de una tarjeta de memoria que permitiría que varios aparatos conectados en red, ya fuesen teléfonos móviles, ordenadores personales o incluso televisores, intercambiasen claves cuánticas mediante una conexión a un servidor central seguro. Han bautizado su invento como QKarD, un juego con las siglas inglesas de «distribución cuántica de claves» (*quantum key distribution*).

«Los elementos más caros de la criptografía cuántica son los sensibles detectores capaces de observar un solo fotón y las partes necesarias para mantenerlos fríos», cuenta Nordholt. Por esa razón, ella y sus colegas decidieron colocar todos los componentes complejos y costosos en un solo ordenador en el centro de la red. Los ordenadores-cliente, cada uno equipado con una QKarD, se conectan con cables de fibra óptica al nodo central, pero no directamente unos con otros. La QKarD es en sí misma un transmisor, con un pequeño láser que permite enviar fotones al nodo central.

La QKarD funciona de manera similar a una centralita telefónica. Cada uno de los ordenadores de la red envía sus propias claves simétricas codificadas en haces de fotones al nodo

central. El cifrado cuántico reemplaza al del método RSA, y permite intercambiar claves simétricas de forma segura. Una vez que las claves se han distribuido entre los distintos ordenadores y el nodo central, este último utiliza dichas claves y una comunicación de tipo AES para intercambiar mensajes entre dos clientes cualesquiera de la red.

El equipo de Nordholt ya ha puesto un modelo de QKarD en funcionamiento. Aunque el sistema completo se encuentra en un laboratorio de Los Álamos, un cable de 50 kilómetros de fibra óptica, enrollado y metido en un cubo bajo un banco del laboratorio, conecta los distintos componentes y simula distancias reales. La compañía Whitewood Encryption Systems ha adquirido los derechos sobre la licencia comercial de la QKarD. Si el servicio llega al mercado, Hughes estima que un nodo central capaz de enlazar a unos 1000 clientes equipados con QKarD costaría unos 10.000 dólares. Si se produjesen en masa, las QKarD en sí podrían venderse por tan solo 50 dólares.

«Me gustaría que los teléfonos y las tabletas incluyesen una QKarD para conectarse de manera segura a un servidor», dice Nordholt. «O podrías tener uno en la oficina y subir claves [a un servidor]. Ello permitiría generar redes de manera orgánica.»

¿UN FUTURO CUÁNTICO?

Preparar la infraestructura mundial necesaria para convertir la criptografía cuántica en una realidad podría llevar más de una década. «Cuanto más desplegado está algo, más difícil resulta reparar fallos», observa Mosca. «Incluso si lográsemos resolver todos los problemas técnicos, habría que llegar a acuerdos para que las distintas redes fueran compatibles y conformasen un solo sistema global de telecomunicaciones. Ni siquiera tenemos un sistema eléctrico común, necesitamos adaptadores cada vez que viajamos.»

A este desafío se añade la urgencia, explica Nordholt: «No se trata solo de proteger el intercambio de números de tarjetas de crédito. El asunto puede ponerse mucho más serio». Hace unos años, cuenta, el Laboratorio Nacional de Idaho realizó un estudio en el que demostraba que se podrían hacer estallar los generadores de una red eléctrica introduciendo datos corruptos en los sistemas que la controlan. «No quiero dibujar escenarios apocalípticos, solo subrayar que se trata de una técnica que podría tener un auténtico impacto en la vida de las personas», apunta la investigadora.

Sin embargo, es muy probable que el primer objetivo de los ordenadores cuánticos no sea una red eléctrica. Numerosos expertos creen que la NSA y otros servicios de inteligencia están almacenando enormes cantidades de datos cifrados que circulan por Internet pero que hoy no pueden descodificarse. Según esta idea, tales datos se estarían guardando con la expectativa de que, antes o después, podrán descifrarse con un ordenador cuántico. En ese escenario no solo estaría en juego la confidencialidad de las comunicaciones futuras, sino también la de nuestras comunicaciones actuales que, ingenuamente, consideramos seguras.

«Sería una locura pensar que no hay gente ahí fuera almacenando todo el tráfico y esperando a que llegue el día en que la tecnología les permita descifrarlo retroactivamente», dice Brassard. «Si bien los ordenadores cuánticos aún no están disponibles, y puede que no lo estén en los próximos 20 años, en cuanto aparezca uno toda la información enviada desde el primer día con las técnicas clásicas de cifrado quedaría instantáneamente comprometida.»

Pero, incluso si la criptografía cuántica se extendiese, no sería el fin del juego del gato y el ratón criptográfico. Si la historia de la criptografía clásica puede servirnos de orientación, siempre aparecen grietas por las que colarse cuando se pasa de los modelos teóricos a su implementación en el mundo real. Cuando se desarrolló la criptografía RSA, se consideraba completamente segura, explica Zulfikar Ramzan, jefe tecnológico de RSA, la compañía que Rivest, Shamir y Adleman crearon para comercializar su invención. Pero, en 1995, el entonces estudiante universitario Paul Kocher descubrió que podía deducir las claves sin más que observar cuánto tardaba el ordenador en codificar una pequeña cantidad de datos.

«Resulta que si la clave tiene más unos que ceros, el cifrado RSA lleva un poco más de tiempo», dice Ramzan. «Repitiendo esta observación una y otra vez y midiendo el tiempo transcurrido, es posible derivar la clave completa.» En aquel caso, la solución fue bastante sencilla, ya que los ingenieros lograron disfrazar los tiempos de cálculo añadiendo cierta aleatoriedad al procedimiento. «Pero, de nuevo, fue el tipo de ataque con el que nadie contaba hasta que un día a alguien se le ocurrió», explica Rayman. «Así que bien podrían aparecer ataques similares en el contexto de la computación cuántica.»

De hecho, el primer ciberataque cuántico ya ha tenido lugar. Hace cinco años, un equipo dirigido por Makarov, que por entonces trabajaba en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, conectó una maleta con un equipo óptico a una línea de fibra óptica de un sistema criptográfico de ID Quantique. Por medio de pulsos láser que cegaban temporalmente los detectores de fotones del dispositivo, el equipo de Makarov logró descifrar una conexión cuántica supuestamente segura.

Tales ataques no quedarían al alcance de un espía ordinario, explica Makarov. «Necesitas ser algo más mayor que un adolescente», señala. «Y necesitas tener acceso a un laboratorio de óptica, una tecnología que aún no ha llegado a los garajes. Aún.» Si bien desde entonces ID Quantique ha mejorado sus dispositivos para que sean inmunes a dichos ataques, la incursión de Makarov abrió la veda y rompió el halo de inmunidad que rodeaba a la criptografía cuántica.

Brassard no alberga ninguna duda de que, a pesar de sus imperfecciones, la loca idea que él y Bennett tuvieron aquel día en la playa resultará clave para la seguridad futura de numerosas redes mundiales. «Se necesita voluntad para hacerlo realidad», señala el investigador. «Y será caro, igual que lo será luchar contra el cambio climático. Pero, en ambos casos, se trata de un gasto minúsculo comparado con el precio que tendremos que pagar si no hacemos nada.» IyC

PARA SABER MÁS

The cost of the «S» in HTTPS. David Naylor et al. en *Proceedings of the 10th ACM International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, págs. 133-140, 2014.

NSA seeks to build quantum computer that could crack most types of encryptiom. Steven Rich y Barton Gellman en *The Washington Post*, 2 de enero de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Criptografía cuántica. Charles H. Bennett, Gilles Brassard y Artur K. Ekert en *IyC*, diciembre de 1992.

Criptografía cuántica comercial. Gary Stix en *IyC*, marzo de 2005.

Criptografía segura. Agustín Rayo en *IyC*, febrero de 2015.

Los límites físicos de la privacidad. Artur Ekert y Renato Renner en *IyC*, enero de 2016.

por Javier Murcia Requena y David Verdiell Cubedo

Gobios y blenios del Mar Menor

La diversidad de ambientes de la laguna favorece su reproducción y proliferación

El Mar Menor es una laguna costera hipersalina, de unos 145 kilómetros cuadrados de superficie, localizada en el sureste de la península ibérica. Es una de las lagunas más grandes de Europa y presenta una elevada heterogeneidad debido a su gran diversidad de hábitats subacuáticos: praderas de vegetación sumergida, fondos arenoso-fangosos, afloramientos rocosos asociados a islas de origen volcánico y ambientes umbríos, estos últimos generados por los balnearios construidos sobre pilares de madera o cemento, un elemento característico del paisaje marmenorense. La enorme variedad de hábitats hacen que esta laguna albergue una rica comunidad de peces.

Hasta el momento, en nuestros estudios hemos contabilizado más de un centenar de especies, entre las que destacan las pertenecientes a las familias Gobiidae (gobios) y Blennidae (blenios), con hasta un total de 19 especies censadas de estos grupos. Se trata de peces generalistas, que viven en un amplio espectro de condiciones ambientales y ocupan lugares cuyas características especiales impiden la proliferación de posibles competidores o depredadores. Los sustratos rocosos son especialmente preferidos por estos peces, ya que los utilizan como soporte para adherir las puestas de huevos.

Durante la época de reproducción, los machos de gobios y blenios buscan un lugar idóneo para que las hembras depositen las puestas: en el Mar Menor hemos observado que lo hacen en pequeñas fisuras, debajo de rocas, en conchas vacías de moluscos bivalvos o incluso en sustratos artificiales, como ladrillos y latas de refresco desechados. Durante este período los machos se vuelven más agresivos y territoriales y solo permiten el paso a las hembras que decidan dejar su preciada carga en forma de huevos. El macho los fecunda inmediatamente, tras lo cual los custodia en todo momento hasta varios días después de la eclosión. Durante la incubación elimina cualquier partícula que se deposite en la puesta y agita regularmente sus aletas pectorales para mantener oxigenados los huevos. Incluso en especies como el blénido *Salaria pavo* se ha constatado que liberan sustancias antimicrobianas que protegen a los embriones.

—Javier Murcia Requena
Redactor de aQua *y fotógrafo submarino*
—David Verdiell Cubedo
Asociación Columbares
Murcia



DURANTE LA REPRODUCCIÓN, los blénidos realizan distintas danzas nupciales. En la imagen se aprecia el cortejo entre dos lagartinas (*Parablennius sanguinolentus*) en un fondo rocoso.



LA CUSTODIA de los huevos es una tarea exclusiva de los machos. Arriba, un gobio chaparrudo (*Gobius niger*) vigila y ventila una puesta. Los huevos de los gobios son típicamente piriformes (*derecha*).

UNA PAREJA DE GALLERBOS O BLÉNIDOS PAVOS (*Salaria pavo*) sale del interior de un ladrillo (*izquierda*), donde la hembra ha realizado la puesta (*derecha*). El macho, de mayor tamaño, presenta una gran cresta, típica de la época de reproducción.

por María Caamaño



María Caamaño es profesora de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.

Las teorías en ciencia

Las teorías científicas agrupan leyes y conceptos en una perspectiva sinóptica. Su contenido y estructura confieren a la ciencia su poder explicativo y predictivo

La curiosidad, de la que finalmente surge la mayor parte de nuestro conocimiento, nos conduce sin cesar, y casi sin reparar en ello, a hacer conjeturas sobre multitud de acontecimientos. No podemos evitar preguntarnos por qué ocurre lo que ocurre, cuáles son las causas de lo que sucede a nuestro alrededor y, también, de lo que acontece en lugares muy alejados de nuestro entorno inmediato o a escalas muy distintas de las que nos son familiares. Así, nos preguntamos acerca de una inundación, del mal funcionamiento de nuestro ordenador, del comportamiento extraño de un amigo o del origen de la crisis económica. Pero también acerca de la evolución de las galaxias, del origen de la vida en la Tierra o de la amenaza de las superbacterias.

El intento espontáneo y recurrente de buscar explicaciones a lo que sucede, de ponerlo en un marco de ideas que nos permita comprenderlo, puede organizarse para que la actividad adquiera cierta complejidad y rigor, convirtiéndola así en un *teorizar*. Si tanto esa complejidad como ese rigor satisfacen determinados requisitos conceptuales y empíricos, diremos que se trata de un teorizar científico. Los productos de dicha actividad constituyen lo que denominamos teorías científicas, y se entiende que estas son la parte conjetural del conocimiento científico. La mecánica cuántica, la teoría de la evolución, el marginalismo económico o la teoría química sobre el origen del cáncer constituyen todas ellas, a pesar de su gran heterogeneidad, teorías científicas.

Son múltiples y muy variopintos los interrogantes que nos asaltan cuando hablamos de teorías científicas: ¿qué función cumplen?, ¿cómo se justifican?, ¿cómo llegan a idearse?, ¿qué relación guardan unas con otras?, ¿qué tipos existen? Todas esas preguntas se encuentran a su vez entrelazadas con otra, que por ello ha merecido una atención especial por parte de la filosofía de la ciencia: ¿qué clase de contenidos incluye una teoría y cómo se estructuran?

En efecto, cuando intentamos identificar las funciones de las teorías científicas, nos vemos abocados a especificar mínimamente su estructura interna. A las teorías generadas en el ámbito científico se les suele atribuir, como principales finalidades, la comprensión, explicación (a partir de causas o mecanismos) y predicción de los fenómenos que se producen en distintas parcelas del mundo, así como la intervención en dichas parcelas y la creación de nuevos recursos tecnológicos. Puede advertirse que, de manera más o menos directa, todas estas finalidades comparten una misma presuposición. A saber, que existen dos niveles contrapuestos: uno en el que se describe o representa aquello que hay que comprender, explicar o predecir; y otro en el que se describe o representa aquello que *permite* comprender, explicar o predecir. En la filosofía de la ciencia de comienzos del siglo XX, esa distinción de nivel solía entenderse como una entre el plano observacional y el teórico. El primero proporcionaría la base de la contrastación de las teorías, a la vez que su contenido empírico; el segundo, la fuerza explicativa y predictiva.



Aunque el debate en torno a la noción de observación se mantiene abierto aún hoy, hay dos ideas ampliamente aceptadas al respecto. La primera es que lo que en ciencia se denomina «observación» va mucho más allá de lo que podemos detectar por medio de los sentidos, e incluye resultados de experimentos complejos donde se aplican ciertas presuposiciones teóricas. La segunda es que dichas presuposiciones han de ser independientes de la teoría contrastada a partir de los resultados.

En el ámbito científico, además de los requisitos que atañen al plano empírico o aplicativo de las teorías, existen otros, no menos específicos, concernientes al propio plano teórico. Tales requisitos nos remiten, en primer lugar, a una exigencia conceptual de generalidad, característica de todo teorizar. Una conjetura cuyo alcance explicativo se limite a un caso particular no constituye una

teoría, por más que nos permita explicar un acontecimiento a partir de una causa; faltaría un marco general de comprensión para el tipo de fenómeno que deseamos explicar. Para establecerlo, necesitamos conceptos generales; es decir, conceptos que delimiten clases de entidades o fenómenos prominentes en el dominio de estudio. A diferencia de lo que ocurre con los conceptos generales no científicos, como los de «fruta recogida en una cesta» o «música favorita de los individuos diestros», los conceptows científicos de «agua», «oro», «tigre» o «electrón» hacen posible realizar inferencias acerca de las propiedades y el comportamiento de aquello que categorizan. Saber que cierta sustancia cae bajo el concepto científico de oro conlleva conocer que se trata de un elemento químico con número atómico 79 y poder inferir, por ejemplo, que si se calentase hasta los 1063 grados centígrados se fundiría.

Los conceptos científicos son los constituyentes básicos, o piezas, del edificio teórico. Pero la arquitectura del edificio depende de los principios teóricos. Es importante notar que los principios o leyes generales que conforman el núcleo de una teoría han de tener un carácter sinóptico; es decir, deben conectar distintos conceptos y articular así un marco de comprensión. Si bien la noción de explicación continúa generando controversia en la filosofía de la ciencia actual, existe un amplio reconocimiento de la importancia que reviste la identificación de causas que, al actuar conforme a ciertas leyes, permitan realizar predicciones. Tradicionalmente, las leyes se han caracterizado como generalizaciones universales, contingentes desde un punto de vista lógico y necesarias desde un punto de vista físico. Con independencia de la revisión contemporánea de algunos de estos rasgos, hay un acuerdo prácticamente unánime acerca de la importancia de las leyes para la realización de inferencias contrafácticas; esto es, inferencias sobre lo que ocurriría si se diesen determinadas condiciones distintas de las presentes.

Así pues, aunque no toda teoría científica proporcione explicaciones en forma de leyes (pensemos en la teoría de la deriva continental), ni toda ley remita a causas (recordemos las leyes de Kepler sobre el movimiento planetario), ni toda explicación científica tenga valor predictivo (como ilustra el caso de las teorías paleontológicas), una gran parte del conocimiento científico sí exhibe estas características en mayor o menor medida. En otras palabras: las teorías suelen estar compuestas por leyes, las cuales remiten habitualmente a causas y sirven para formular predicciones. Por otro lado, el aspecto sinóptico de los principios teóricos, junto con su contrastabilidad empírica mediante comprobaciones cruzadas e independientes, sigue dotando de carácter científico incluso a aquellas teorías y disciplinas más alejadas de los casos prototípicos.

En el ámbito científico, además de los requisitos que atañen al plano empírico o aplicativo de las teorías, existen otros, no menos específicos, concernientes al propio plano teórico

En la contrastación, que imprime carácter científico a las teorías, el marco general de ideas que manejamos ha de ser tal que posibilite inferir, con ayuda de ciertos añadidos, consecuencias empíricas concretas que permitan conectar el marco teórico general, sumamente abstracto, con algún aspecto preciso de un fenómeno concreto. Los dos principales añadidos son la descripción de las condiciones iniciales (aquellas dadas al iniciarse un experimento u observación) y los supuestos auxiliares acerca del instrumental empleado, la no interferencia de determinados factores o el tratamiento estadístico de los datos recopilados.

Además de todo lo dicho, hemos de tener en cuenta que las teorías científicas —al igual que los ríos, los volcanes o los seres humanos— son entidades cambiantes, que, no obstante, mantienen su identidad a lo largo del tiempo. Las teorías se originan a partir de otras, crecen apoyándose en otras o producen otras, lo que se traduce en una compleja articulación intra- e interteórica. Las relaciones entre teorías pueden ser de presuposición (una presupone a otra), de evolución o especialización, de incorporación, o bien de conflicto. Las teorías dependen de otras no solo para su contrastación empírica, sino también para engendrar especializaciones. Asimismo, puede ocurrir que los principios teóricos y las aplicaciones exitosas de una teoría se mantengan en otra, como ocurre con la incorporación de la teoría planetaria de Kepler en la mecánica newtoniana, o con la de la teoría especial de la relatividad en la relatividad general. Por último, cuando la aplicación de los conceptos de una teoría excluye la aplicación de los conceptos de otra orientada hacia un mismo dominio, la relación entre ambas es de conflicto o incluso de inconmensurabilidad, como parece suceder en el controvertido caso del paso de la mecánica clásica a la mecánica relativista.

Así pues, las teorías científicas viven no solo más allá de quienes las idearon, sino que en ocasiones lo hacen en una forma tal que aquellos incluso desaprobarían. En su *Exposición del sistema del mundo* —publicada en 1796, más de un siglo después de los *Principia* de Newton—, Laplace explica la unidireccionalidad y la coplanaridad aproximada de las órbitas planetarias a partir de las leyes de la mecánica newtoniana y de la hipótesis nebular. Y lo hace sin postular, como hiciera Newton, la intervención de un dios creador.

Narra la leyenda que, ante un extrañado Napoleón Bonaparte, sorprendido de que en una obra sobre el universo no se mencionara a su creador, Laplace replicó: «Señor, nunca he necesitado esa hipótesis». IyC

PARA SABER MÁS

The semantic conception of theories and scientific realism. Frederick Suppe. University of Illinois Press, 1989.
Pluralidad y recursión: Estudios epistemológicos. Carlos Ulises Moulines. Alianza Editorial, 1991.
Fundamentos de filosofía de la ciencia. José Díez y Carlos Ulises Moulines, 3.ª edición. Ariel, 2008.
The Routledge companion to philosophy of science. Dirigido por Stathis Psillos y Martin Curd, 2.ª edición. Routledge, 2014.
Natural kinds and classification in scientific practice. Dirigido por Catherine Kending. Routledge, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los conceptos científicos. José Díez en *IyC*, enero de 2014.
Los límites del método científico. Adán Sus en *IyC*, abril de 2016.
Las leyes en ciencia. José Díez en *IyC*, mayo de 2016.

por Andrew A. Meharg

Andrew A. Meharg es botánico y edafólogo de la Universidad Queen's en Belfast.



Retos de la agricultura urbana

La contaminación supone un riesgo para la producción de alimentos en las ciudades

Cada vez más gente se traslada del campo a las ciudades. A menudo se considera que los huertos urbanos son el futuro, al menos en lo que respecta a una parte de la alimentación de quienes viven en ese entorno. Pero las ciudades distan mucho de los mejores terrenos agrícolas, y no puede darse por sentado que los alimentos producidos en ellas sean seguros.

El cultivo de alimentos en ambientes urbanos parece una propuesta atrayente por su sostenibilidad: puede aprovecharse el calor residual que genera la ciudad y pueden reciclarse las aguas grises (las usadas en baños, duchas y cocinas) o de escorrentía superficial, así como las aguas cloacales, ricas en nutrientes. Además, reduciría la huella de carbono asociada al transporte de alimentos y haría más verdes las ciudades. A las familias más pobres, un huerto urbano puede aportarles unos ingresos y diversificar su alimentación. Los proyectos comunitarios promueven la interacción social y la actividad al aire libre, con lo que se doblan los beneficios para la salud. Las zonas que podrían destinarse a la agricultura, como las granjas verticales [*véase* «Agricultura vertical», por Dickson Despommier; Investigación y Ciencia, septiembre de 2010] y las parcelas de huertos entre los bloques de pisos, en sus cubiertas o en su interior, podrían dar forma a nuestras urbes del futuro.

Pero antes de que la agricultura urbana pueda expandirse a gran escala, hay que tener en cuenta un aspecto clave que diferencia las ciudades del campo: la contaminación. La actividad industrial, la infraestructura de transporte, el consumo doméstico de combustibles fósiles y los productos químicos que van a parar a las aguas residuales domésticas contaminan los suelos de las ciudades. Estas aguas contienen detergentes y fármacos procedentes de la orina, así como una gran diversidad de contaminantes de origen industrial. El aire urbano, además de polvo del suelo en suspensión, presenta niveles elevados de óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, hidrocarburos y material particulado procedentes de las emisiones de los automóviles. Se sabe que la contaminación del aire reduce las cosechas urbanas, pero no se conocen bien las consecuencias de consumir alimentos cubiertos con estas sustancias.

La contaminación del suelo no es uniforme en toda la ciudad. Pero, en general, las frutas y verduras producidas en las urbes contienen más sustancias perjudiciales que las que proceden del campo. Actualmente se debate si este aumento en la carga contaminante comporta un riesgo para la salud. Para saberlo, deberían realizarse controles sistemáticos. Cada zona y variedad vegetal que vayan a cultivarse deberían ser analizadas, debido a las diferencias que pueden exhibir en la acumulación de compuestos tóxicos.



Pero de la misma manera que la contaminación perjudica las cosechas, la propia actividad agrícola puede introducir en el ambiente compuestos no deseados. Los suministros de agua pueden contaminarse con abonos inorgánicos y estiércol —lo que causa un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas en aguas ricas en nutrientes— y también con plaguicidas. Como consecuencia de trabajar el suelo se producen malos olores y ruido excesivo y se levanta polvo. Además, tener campos de cultivo cerca de las personas es problemático, especialmente para los niños, que pueden tragar tierra del suelo.

Una manera de permitir la actividad agrícola intensiva en las urbes y evitar la posible contaminación del suelo es la basada en cultivos hidropónicos, que consiste en hacer crecer las plantas en agua, sin tierra. No obstante, dado que muchas ciudades tienen dificultades para abastecerse de agua para uso doméstico e industrial, las granjas hidropónicas a gran escala supondrían un coste adicional importante. Aunque en principio el agua de esos cultivos podría reciclarse, ello no es siempre posible debido a su alto contenido en nutrientes y plaguicidas. En climas cálidos, llevar agua a las zonas agrícolas urbanas podría aumentar las plagas, como las de mosquitos transmisores de la malaria.

Quizá en el futuro se construyan ciudades que eviten los actuales problemas de contaminación. Pero en las urbes existentes, donde los cultivos constituyen una actividad no planeada, es necesario pensar en una nueva estrategia para que la agricultura tenga un porvenir. Con el cultivo de productos no comestibles, como las plantas que producen fibras textiles o las destinadas a biomasa o leña, se podrían aprovechar los suelos urbanos y suburbanos, la ciudad se volvería más verde, las aguas residuales y los biosólidos se reciclarían, y se obtendrían productos no alimentarios que actualmente ocupan suelos agrícolas de alta calidad. Hay que evaluar también el rendimiento económico de la agricultura urbana, así como los beneficios no económicos, como disponer de mejores espacios para la convivencia y las actividades comunitarias. Si los residuos urbanos pueden reciclarse a través de la agricultura para obtener energía, materiales para la construcción y ropa, todo el mundo saldrá beneficiado y nuestras ciudades acabarán convertidas en un entorno más sano.

Artículo original publicado en *Nature* 531, pág. S60, 2016. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Bullifoundation.

Los insectos llegan a la mesa

Tras años de controversia, Europa admite estos artrópodos en nuestro menú

En el siglo XXI la población mundial pasará de 7000 a 10.000 millones de personas, un crecimiento que requerirá nuevas estrategias alimentarias. La FAO apuesta por la entomofagia, el consumo de insectos, como una de las alternativas plausibles. Estos artrópodos ya forman parte de la dieta en zonas de Asia, África y América Latina. Más de 2000 millones de personas los ingieren de forma habitual.

Desde la Universidad Autónoma del Estado de México, Felipe Carlos Viesca y Alejandro Tonatiuh publicaron en 2009 un estudio, «La entomofagia en México», que analizaba aspectos históricos, culturales y nutritivos de esta práctica. Según los autores, se describe ya en el Antiguo Testamento, donde se habla del consumo de abejas, escarabajos y langostas. También en el Nuevo Testamento se relata cómo Juan Bautista sobrevivió en el desierto a base de langostas y miel. En el informe queda patente la seguridad alimentaria de estos productos, consumidos por diferentes poblaciones a lo largo de la historia. En sus conclusiones, los investigadores apuestan por la gastronomía como instrumento para impulsar el aprovechamiento de este recurso natural.

Enrique Olvera, chef del restaurante Pujol, referencia de la revolución culinaria mexicana, hace caso a Viesca y Tonatiuh: utiliza en su menú insectos secos, larvas de hormiga tostadas, salsa de saltamontes y otros insectos tradicionales mexicanos. También el restaurante más prestigioso de Brasil, el DOM de Alex Atala, sirve platos con insectos, como el dado de piña con hormiga amazónica, que adapta João Alcântara en su restaurante barcelonés Alquimia Fogo (*fotografía*).

Por razones culturales, las restauraciones europea y estadounidense no han tenido a los insectos en su punto de mira. Sin embargo, a lo largo de los últimos años han surgido varias propuestas y estudios que indican un cambio de mentalidad.

En la edición de 2012 del congreso Gastronomika de San Sebastián, René Redzepi, chef del prestigioso Noma de Copenhague, presentó un garum de saltamontes y dio a probar hormigas. Toda una declaración de intenciones.

En 2013, por encargo de la FAO, la Universidad de Wageningen publicó el informe «Los insectos comestibles: perspectivas de futuro para la alimentación humana y su seguridad alimentaria». El estudio concluía que los insectos comestibles pueden convertirse en una prometedora alternativa a la carne. Apoyada en este documento, la FAO ha promovido el consumo de insectos como una buena opción para paliar el hambre y enriquecer la gastronomía.



JOÃO ALCÂNTARA

En mayo de 2014, la Universidad de Wageningen y la FAO organizaron una Conferencia Internacional sobre el papel de los insectos en la producción sostenible de alimentos. El éxito de la convocatoria fue espectacular: asistieron más de 400 participantes de 45 países. La conferencia inaugural, pronunciada por el subdirector general de la FAO Eduardo Rojas, se titulaba «Insectos para alimentar el mundo». Otra clara muestra de la posición de la institución.

La «obstinación» de la FAO se basa en datos nutricionales. El consumo de 100 gramos de orugas secas aporta, además de una cantidad reducida de agua, vitaminas y minerales, 53 gramos de proteínas, 17 de hidratos de carbono y 15 de materia grasa; unas 430 kilocalorías en total. Proporcionalmente, los insectos aportan más proteínas y grasas que las carnes y los pescados.

La regulación de la comercialización de insectos en Europa ha sido motivo de controversia. En 2008 se prohibió la venta de insectos en el puesto que Llorenç Petràs había abierto cuatro años antes en el mercado de La Boquería en Barcelona. Eran alimentos no autorizados por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA).

Pero ante la presión de la FAO y otras organizaciones, la Comunidad Económica Europea encargó a la EFSA un informe sobre la problemática que podía ocasionar el consumo de insectos en Europa. Finalmente, en octubre del año pasado se publicó un esperado estudio sobre la seguridad en la utilización de insectos para alimentos, informe previo a la aprobación del consumo de insectos en Europa. En él se concluye que, a pesar de la falta de conocimiento de los peligros que entrañaría esta práctica, los patógenos potencialmente nocivos tienen más probabilidades de venir de la cría y el procesado que de los propios insectos. Por tanto, da vía libre a su uso, con los controles necesarios en cuanto a la cría y procesado.

La Plataforma Internacional de Insectos para Alimentos y Piensos (IPIFF), que representa los intereses de los criadores, ya se está organizando para poder vender insectos en la Unión Europea.

Y mientras Europa se prepara para dar encaje a la nueva propuesta alimentaria, a escala mundial ya se están produciendo grandes cantidades de insectos para el consumo humano. En Tailandia se comercializan 7500 toneladas de grillos por año, con previsiones de aumento. En Sudáfrica, la empresa Agriprotein indica que podría servir, en breve, 2500 toneladas de productos de insectos por año. Los expertos pronostican que la producción mundial podría llegar a 500.000 toneladas de insectos anuales en los próximos años. Ahora le toca a la cocina poner su creatividad al servicio del producto.



LINGÜÍSTICA

LA GUERRA DE LAS LENGUAS

¿Dónde se originó la familia de lenguas indoeuropeas? Lejos de resolver un antiguo debate, las nuevas pruebas aportadas por el ADN y la biología evolutiva no han hecho más que avivarlo

Michael Balter

«¿QUÉ HAY EN UN NOMBRE?», le preguntaba Julieta a Romeo. «Eso que llamamos rosa, con otro nombre olería igual de dulce.» Una Julieta de la vida real habría hablado con Romeo no en un inglés shakesperiano, sino, seguramente, en un oscuro dialecto del italiano medieval. Pese a ello, la palabra que habría usado para denominar aquella flor de dulce perfume (*rosa*, en italiano contemporáneo) habría compartido una misma raíz lingüística con sus versiones en inglés (*rose*) y en numerosas otras lenguas habladas en Europa (*Rose*, con erre mayúscula, a la manera alemana, o minúscula, como en el francés *rose*). ¿En croata? Una aromática *ruža*. Y para los cerca de 60.000 escoceses que todavía hablan el antiguo gaélico escocés, este símbolo del amor apasionado es una *ròs*.

EN SÍNTESIS

Cerca de la mitad de la población mundial habla alguno de los idiomas que derivan de una antigua lengua conocida como protoindoeuropeo, o pIE.

Los lingüistas hace tiempo que defienden que el pIE se extendió desde las amplias estepas de Asia central hasta Europa hace entre 6000 y 5000 años.

Una hipótesis alternativa postula que el pIE comenzó su expansión hace unos 8000 años desde lo que ahora es Turquía, tras la introducción de la agricultura en aquellas regiones.

Las últimas pruebas aportadas por la biología evolutiva y las muestras de ADN antiguo, lejos de zanjar la disputa, han avivado la controversia.

MARK ALLEN MILLER

¿Por qué lenguas tan geográficamente diversas se valen de palabras similares para la misma flor? Todas ellas, junto con más de otras 400, pertenecen a una misma familia lingüística increíblemente extendida: la de las lenguas indoeuropeas, todas las cuales tienen un origen común. Entre ellas se cuentan el griego, las lenguas baltoeslavas, el latín y las lenguas románicas, el inglés y las demás lenguas germánicas, el sánscrito y muchos idiomas hablados en Irán y el subcontinente indio. Constituyen el grupo lingüístico más dominante de la historia de la humanidad. Aunque alrededor del 7 por ciento de las 6500 lenguas que se calcula que hay en el mundo son indoeuropeas, estas son habladas por 3000 millones de personas, casi la mitad de la población mundial. Saber cómo, por qué y cuándo se extendieron de tal modo es clave para comprender los cambios sociales, culturales y demográficos que llevaron a la creación de las diversas poblaciones actuales de Europa y gran parte de Asia. Tal y como comenta Paul Heggarty, lingüista del Instituto Max Planck para Ciencias de la Historia Humana, en Jena, Alemania: «Tenemos que explicar por qué el indoeuropeo tuvo un éxito tan exagerado, tan abrumador».

Debido a que las palabras y las lenguas no fosilizan, durante más de cien años se dejó la tarea de rastrear sus movimientos a través del tiempo y del espacio a los lingüistas tradicionales y a un pequeño número de arqueólogos. Sin embargo, con la reciente entrada en escena de biólogos y expertos en ADN antiguo, el estudio del origen de las lenguas indoeuropeas se ha tecnificado. Armados con nuevas herramientas teóricas y estadísticas, estos investigadores han comenzado a transformar la lingüística, que de ser un ejercicio de lápiz y papel se ha convertido en un campo que usa potentes ordenadores y métodos tomados de la biología evolutiva.

Se podría pensar que este intento de modernizar la lingüística llevaría a entender mejor dónde y cuándo surgieron las lenguas indoeuropeas. Sin embargo, en gran medida ha sucedido lo contrario, con lo que la cuestión ha desembocado en una disputa todavía mayor. Todo el mundo está de acuerdo en un aspecto clave: las lenguas indoeuropeas descendieron de un ancestro común, una lengua madre llamada protoindoeuropeo, o pIE. No obstante, por qué esta lengua generó tantos descendientes y dónde se originó sigue generando controversia.

Los investigadores se dividen en dos grandes grupos. Uno de ellos, que incluye a la mayoría de los lingüistas tradicionales, sostiene que fueron los nómadas de Asia Central, que inventaron la rueda y domesticaron el caballo, quienes comenzaron a extender la lengua madre por Europa y Asia hace unos 6000 años. El otro, encabezado por el arqueólogo británico Colin Renfrew, atribuye su origen a los campesinos que vivieron mucho antes en lo que ahora es Turquía, unos mil kilómetros más al sur, los cuales habrían comenzado a extender la lengua en algún momento posterior a que empezasen a hacer lo propio con la agricultura, hace 8500 años.

A lo largo de los años, la preferencia por una u otra teoría ha ido fluctuando. En 2003, varios biólogos evolucionistas publicaron una serie de estudios que concluían que el árbol genealógico indoeuropeo se originó en Oriente Medio hace al menos 8000 años, un resultado acorde con la hipótesis de los agricultores; para ello, se basaron en la idea de que la evolución de las palabras puede imitar a la de los organismos. Pero, en los últimos dos años, algunos lingüistas, arqueólogos y genetistas han contraatacado: a partir de análisis computacionales y muestras de ADN de esqueletos antiguos, han obtenido indicios a favor del origen nómada. Por ahora, el péndulo sigue oscilando.



Michael Balter es periodista. Sus artículos han aparecido en *Audubon*, *National Geographic* y *Science*, entre otras publicaciones. Su libro *The Goddess and the Bull* (Free Press, 2005) trata sobre la excavación de Çatalhöyük, uno de los mayores y más antiguos asentamientos del mundo, en Turquía.

EL CABALLO, POR SUPUESTO

Los eruditos no tuvieron que esperar a los ordenadores de alta velocidad para identificar conexiones entre las lenguas indoeuropeas. Este descubrimiento emergió ya en el siglo XVIII, después de que los europeos hubiesen empezado a viajar a lugares remotos. Algunos de los paralelismos entre lenguas ampliamente diseminadas se consideran hoy reveladores. Así, las palabras para «fuego» en sánscrito, *agní*, y en latín, *ignis*, indican claramente su parentesco con la familia indoeuropea.

Hacia el siglo XIX, los lingüistas ya estaban seguros de que tenía que existir un ancestro común a todas las lenguas indoeuropeas. «Fue toda una conmoción pensar que las lenguas clásicas europeas habían surgido de la misma fuente que el sánscrito, una lengua exótica hablada en la India, al otro lado del mundo», señala David Anthony, arqueólogo del Hartwick College y ferviente defensor del origen nómada del protoindoeuropeo.

Así las cosas, los lingüistas se propusieron reconstruir esta lengua ancestral. En algunas ocasiones no surgieron mayores dificultades, sobre todo si la palabra original no había cambiado hasta tornarse irreconocible. Por ejemplo, los lingüistas pudieron tomar la palabra inglesa *birch*, la alemana *Birke*, la sánscrita *bhūrjá* y otras voces indoeuropeas que significan «abedul» y, aplicando a la inversa varias reglas lingüísticas básicas sobre la evolución de los idiomas, concluir que la raíz en pIE debió ser algo así como *bherh$_1$ǵ- (el asterisco indica que se trata de una palabra reconstruida para la cual no hay pruebas directas; el subíndice 1 hace referencia a un sonido generado en la parte trasera de la boca). Otras reconstrucciones no son tan evidentes. Así, se determinó que la palabra en pIE para «caballo» (*áśva-* en sánscrito, *híppos* en griego, *equus* en latín y *ech* en irlandés antiguo) era *h$_1$éḱwo.

Sin embargo, cuando algunos lingüistas trataron de identificar a los pueblos que hubo tras aquella lengua, el asunto se complicó. Primero conectaron ciertas culturas con el pIE, un enfoque llamado paleontología lingüística. Se dieron cuenta de que el pIE contenía muchos términos para animales domesticados, como caballos, ovejas y vacas, y plantearon por ello que existió una «tierra natal» indoeuropea con características pastorales. Pero este enfoque terminó por dar problemas. A principios del siglo XX, el prehistoriador alemán Gustaf Kossinna propuso que los primeros indoeuropeos fueron un grupo establecido en Centroeuropa que hace unos 5000 años empezó a producir la cerámica cordada, una clase de cerámica decorada con intrincadas impresiones de cuerdas. Kossinna sostuvo que este grupo se expandió, llevando consigo su lengua, desde lo que hoy es Alemania. La idea cautivó a los nazis, que resucitaron el término «ario» (una denominación del siglo XIX para los indoeuropeos) junto con sus connotaciones de superioridad racial.

ORIGEN DE UNA LENGUA ANTIGUA

Dos posibles tierras natales

Casi la mitad de la población mundial habla al menos uno de los más de 400 idiomas que descienden de una lengua madre conocida como protoindoeuropeo, o pIE, cuya influencia se extiende hasta lugares tan occidentales como Irlanda o tan orientales como China. Aunque se han reconstruido muchas de las palabras del pIE, los investigadores siguen debatiendo sobre su origen.

Hipótesis de los kurganes

La hipótesis de los kurganes, preferida durante largo tiempo por los lingüistas tradicionales, sitúa a los hablantes originales del pIE en las estepas al norte del mar Negro. Esta idea, que recibe su nombre de los túmulos sepulcrales característicos de las culturas de las estepas, sugiere que los nómadas comenzaron a difundir el pIE a caballo hacia el este y el oeste hace 6000 años.

Hipótesis de Anatolia

Desde los años ochenta del siglo XX, varios investigadores mantienen que el pIE pudo haber sido difundido hace unos 8000 años por campesinos de la península de Anatolia. Aunque no son concluyentes, algunas pruebas arqueológicas y ciertos cálculos basados en el ritmo al que evolucionan las lenguas apoyan esta idea.

Árbol genealógico del protoindoeuropeo

Pese a que el momento y el lugar del origen del pIE son discutibles, los lingüistas generalmente coinciden en una idea aproximada de cómo los diversos grupos de lenguas indoeuropeas descendieron de la lengua madre. El diagrama de la derecha, muy simplificado, pretende mostrar algunas relaciones generales entre distintos grupos de lenguas, no sus fechas reales de divergencia.

FUENTE: «MAPPING THE ORIGINS AND EXPANSION OF THE INDO-EUROPEAN LANGUAGE FAMILY», POR REMCO BOUCKAERT ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 337, 24 DE AGOSTO DE 2012; MAPPING SPECIALISTS *(mapa)*; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ *(gráfico)*

Durante años, ese respaldo por parte de los nazis dio una mala reputación a los estudios indoeuropeos. Muchos investigadores atribuyen a Marija Gimbutas, arqueóloga fallecida en 1994, el restablecimiento, a partir de los años cincuenta, del prestigio de la disciplina. Gimbutas situó los orígenes del pIE en las estepas pónticas, al norte del mar Negro. Según ella, la principal impulsora del pIE fue la cultura kurgán de la Edad de Cobre, cuyos primeros registros arqueológicos datan de hace unos 6000 años. Según Gimbutas, tras errar durante un milenio por las desoladas estepas, donde los nómadas aprendieron a domesticar el caballo, cargaron hacia Europa central y del este, donde impusieron su cultura patriarcal y las fuertemente articuladas vocales y consonantes de su lengua indoeuropea natal. En concreto, Gimbutas identificó al pueblo yamnaya, que vivió en las estepas pónticas hace entre 5600 y 4300 años, como hablante original del pIE.

Otra pruebas reforzaron ese punto de vista. En 1989, David Anthony empezó a analizar en Rusia, Ucrania y Kazajistán dientes de caballo procedentes de excavaciones efectuadas con anterioridad por arqueólogos soviéticos. Anthony y sus colaboradores confirmaron hipótesis previas según las cuales había desgaste por el bocado de la brida en dientes de hace incluso 6000 años, lo que adelantaba en unos 2000 los primeros indicios de la domesticación del caballo y, en consecuencia, de la monta [*véase* «Origen del montar a caballo», por David Anthony, Dimitri Y. Telegin y Dorcas Brown; Investigación y Ciencia, febrero de 1992]. Los mismos estudios aportaron también pruebas que vinculaban la cultura yamnaya con varios desarrollos tecnológicos, como el uso de vehículos con ruedas; por ejemplo, carros de guerra. Estos hallazgos apoyaron la teoría de que aquellos pastores de las estepas tuvieron la tecnología y los medios de transporte necesarios para diseminarse con

rapidez desde su tierra natal y extender su lengua en todas las direcciones.

CAMPESINOS REVOLUCIONARIOS

La teoría de la estepa, también conocida como la hipótesis de los kurganes, así bautizada por los túmulos funerarios donde estos pueblos de pastores enterraban a sus líderes, no fue puesta en duda hasta los años ochenta. Fue entonces cuando Renfrew impulsó una idea radicalmente diferente: la hipótesis de Anatolia (con este nombre, que proviene de la palabra griega para «amanecer», se conoce a la península que coincide en muy buena medida con la actual Turquía). Renfrew, decano de los prehistoriadores británicos y hoy miembro de la Cámara de los Lores, había pasado años excavando en Grecia y quedó sorprendido de lo mucho que se asemejaban algunos artefactos que había encontrado, especialmente algunas figuras talladas de mujer, a los que habían aparecido en excavaciones arqueológicas de Turquía y Oriente Próximo.

Los arqueólogos ya sabían que la agricultura se extendió desde Oriente Próximo hasta Grecia, y Renfrew se preguntó si, además de en la cultura, no habría una continuidad también en la lengua. En un libro y en varias ponencias, planteó que los primeros hablantes del pIE podían haber sido los campesinos que hace 8500 años migraron desde Anatolia hacia Europa, quienes, junto a sus técnicas agrícolas, habrían llevado también sus palabras.

Los lingüistas tradicionales, que habían pasado décadas trabajando con lápiz y papel en la reconstrucción del pIE, rastreando palabras indoeuropeas modernas hasta sus raíces originarias, se escandalizaron. La mayoría rechazó la hipótesis de Anatolia, en ocasiones con duras diatribas. Un catedrático de la Universidad de Oxford calificó la idea de «basura» y otro escéptico declaró que «un lector ingenuo podría verse muy engañado por soluciones tan simplistas como las que ofrece el autor».

Renfrew y sus partidarios contraatacaron, argumentando que la hipótesis de la estepa no era capaz de explicar la amplia expansión del pIE, desde donde fuera que se originara, tanto hacia Europa como hacia Asia. Se sabe que se hablaron lenguas derivadas del pIE en puntos tan occidentales como Irlanda o en lugares tan orientales como la cuenca del Tarim, en lo que ahora es el noroeste de China, y en la India. Si la hipótesis de los kurganes era correcta, una pregunta clave era cómo el pIE había llegado desde las estepas hasta el este de Asia. ¿Acaso se extendió por el norte de los mares Negro y Caspio, como en la hipótesis de la estepa? Renfrew no ve ninguna prueba arqueológica para esta ruta. ¿O tomó, ya antes, un camino más meridional y hacia el este desde Anatolia? Según él, era más probable que el pIE se expandiera desde Turquía por el sur del mar Negro y, luego, a lo largo de las primeras rutas comerciales a través de los actuales Irán y Afganistán.

Así pues, Renfrew cree que un único origen en Anatolia basta para explicar la expansión simultánea del pIE hacia el este y hacia el oeste, ya que la península ofrece las mejores pruebas históricas de movimientos entre los continentes europeo y asiático. Añade, además, que el único impulsor sociotecnológico lo suficientemente poderoso para propagar la lengua en direcciones opuestas hasta lugares tan lejanos fue la aparición de la agricultura, que se produjo en el Creciente Fértil (justo al sur y al este de la actual Turquía) hace unos 11.000 años. Esta transformación de la sociedad humana, que de estar constituida por cazadores-recolectores pasó a componerse de comunidades agricultoras sedentarias, caracterizó la llamada Revolución Neolítica y fue «lo único realmente importante que sucedió a escala europea», en palabras de Renfrew. «Si se quería una teoría simple de la aparición de las lenguas indoeuropeas, aferrarse al Neolítico era lo mejor que podía hacerse.»

Uno de los ejemplos por antonomasia en los que se basan las objeciones de los lingüistas a la hipótesis de Renfrew es el origen de las palabras que significan «rueda» en algunas lenguas indoeuropeas. La reconstrucción de la raíz protoindoeuropea de la que proceden es $*k^w\acute{e}k^w lo$-, que se convirtió en *cakrá-* en sánscrito, en *kúklos* en griego y en *kukäl* en tocario A, una lengua indoeuropea ya extinguida de la cuenca del Tarim. Los primeros indicios de vehículos con ruedas (unas representaciones en tabletas de la antigua Mesopotamia, en el actual Irak) datan de hace aproximadamente 5500 años. En los kurganes, los primeros restos materiales de carruajes se remontan a hace unos 5000 años.

Numerosos lingüistas han sostenido que esa raíz protoindoeuropea de la que proceden algunos de los nombres indoeuropeos de la rueda no pudo haber aparecido antes de que esta fuera inventada, por lo que el pIE no podría tener más de unos 5500 años; es decir, unos 5000 menos que la agricultura. «Eso no significa que los hablantes del pIE inventaran la rueda», señala Anthony, «sino que adoptaron sus propias palabras para las diferentes partes de los vehículos con ruedas».

Sin embargo, Renfrew y otros han argumentado que $*k^w\acute{e}k^w lo$- derivó de una raíz muy anterior que significaba «girar» o «rodar», y que la adaptación para denominar la rueda se produjo solo después. «Existía todo un lenguaje sobre la rotación antes de la invención de la rueda», sostiene Renfrew.

Andrew Garrett, lingüista de la Universidad de California en Berkeley y partidario de la hipótesis de la estepa, coincide en que $*k^w\acute{e}k^w lo$- deriva de una raíz más antigua, $*k^w el(h)$-, que probablemente significaba «girar» o «rodar», y que la palabra $*k^w\acute{e}k^w lo$- se habría formado duplicando esa raíz por repetición de la secuencia $*k^w e$-. Podría parecer que el argumento favorece la teoría de Renfrew, pero, como indica Garrett, si bien este tipo de duplicaciones eran comunes en pIE para la formación de verbos, fueron rarísimas para formar sustantivos. Ello le da a entender, como a otros lingüistas, que la voz protoindoeuropea $*k^w\acute{e}k^w lo$- tuvo que haberse desarrollado en un tiempo próximo al de la invención de la rueda.

PRUEBAS CONTROVERTIDAS

Las cosas estaban cuesta arriba para Renfrew y su hipótesis de Anatolia cuando, en 2003, una bomba cayó en el debate desde una dirección completamente inesperada: la biología evolutiva. Russell D. Gray, biólogo que se había ganado una buena reputación estudiando la cognición en los pájaros, y Quentin D. Atkinson, que en aquel momento era su estudiante de doctorado en la Universidad de Auckland, en Nueva Zelanda, se sirvieron de los métodos más modernos de la biología computacional para datar los orígenes del pIE. Para ello, los investigadores adaptaron la glotocronología, una antigua técnica lingüística basada en comparar la proporción de cognados (palabras con raíces compartidas) en diferentes lenguas para determinar el tiempo transcurrido desde que divergieron. Hacía tiempo que este método había caído en desuso, ya que obligaba a dar por sentado que las palabras cambian de forma a un ritmo constante, algo que se sabe que no es cierto. Gray y Atkinson emplearon una versión nueva y mejorada de la glotocronología junto con otras técnicas estadísticas usadas para determinar los árboles filogenéticos de los organismos. Su base de datos incluía cogna-

dos de 87 lenguas indoeuropeas, incluido el hitita, una lengua extinguida que se habló en Anatolia.

Aquellos resultados fueron un gol por la escuadra a favor de la hipótesis de Anatolia. Calculasen como calculasen sus números, los dos investigadores obtuvieron que la divergencia entre las lenguas indoeuropeas y el pIE se produjo, como muy tarde, hace 8000 años, casi 3000 antes de la aparente invención de la rueda. Pese a los gritos de protesta de algunos lingüistas, que objetaban que las palabras no cambian del mismo modo que los organismos y los genes, el artículo tuvo una gran repercusión y otorgó un fuerte empuje a la hipótesis de Anatolia. Según Gray, que ahora trabaja como codirector del Instituto Max Planck para Ciencias de la Historia Humana (donde investiga Heggarty), Atkinson y él simplemente trajeron la lingüística al siglo XXI.

Además, aunque Gray y Atkinson descubrieron que la primera extensión del pIE siguió los pasos de la expansión de la agricultura, detectaron también una segunda divergencia hace 6500 años, de donde saldrían las lenguas itálicas (y, en última instancia, las romances), celtas y baltoeslavas. Concluyeron que las hipótesis de la estepa y la anatólica no tenían que ser «mutuamente excluyentes por necesidad».

En efecto, análisis posteriores reafirmaron la hipótesis de Anatolia con tal fuerza que algunos lingüistas jóvenes empezaron a demandar a los veteranos que dejaran de poner pegas. «Las objeciones de la lingüística tradicional a la hipótesis de Anatolia están comenzando a diluirse un poco», escribió Heggarty en junio de 2014 en la revista *Antiquity*.

Sin embargo, el llamado a que los partidarios de la hipótesis de la estepa se rindiesen tal vez fuese precipitado. En 2013, Garrett y Will Chang, estudiante de doctorado suyo, emprendieron su propio análisis aplicando la misma metodología que Gray pero adoptando una nueva premisa: «forzaron» a ciertas lenguas a ser ancestrales para otras, basándose en lo que, recalcan, son datos históricos. Impusieron, por ejemplo, que el latín clásico fuese directamente ancestral para las lenguas romances, como el español, el francés y el italiano. Gray y Atkinson, en cambio, habían permitido que alguna forma todavía no identificada del latín popular hablado en las calles del Imperio Romano pudiera haber sido el verdadero ancestro de las lenguas romances.

Los resultados de Garrett y Chang, publicados el año pasado en *Language*, fueron otro gol por la escuadra, pero esta vez a favor de la hipótesis de la estepa. Pese a todo, Heggarty mantiene que el equipo de Garrett se equivoca al presuponer que algunas lenguas antiguas fueron directamente ancestrales para otras. Según Heggarty, incluso pequeñas diferencias entre el latín clásico y el «vulgar» podrían tumbar las estimaciones de Garrett, quien por su parte sigue sin estar convencido: «Para muchas de estas lenguas sabemos bastante sobre su historia y sus comunidades de hablantes», comenta. «Las que mejor conocemos son el griego y el latín. No es probable que existieran otras variedades del griego y del latín circulando de las que no sepamos nada.»

Gray, por su parte, califica el artículo de *Language,* que usó sus propios métodos contra la hipótesis de Anatolia, como un «hermoso trabajo» que realmente se compromete con los métodos «en vez de limitarse a decir que [Atkinson y yo] estamos equivocados». Sin embargo, Gray y su equipo han empezado ahora a recalcular los datos de Garrett, pero dejando que sean estos los que decidan si algunas lenguas fueron ancestrales para otras en vez de presuponerlo. Aunque se trata de un estudio preliminar, Gray y sus colaboradores parecen estar encontrando que los números vuelven a dar ventaja a la hipótesis de Anatolia.

NUEVAS PRUEBAS DE ADN

Si las palabras por sí solas no son capaces de decirnos quién tiene razón, quizás otras pruebas ajenas al campo de la lingüística puedan ayudar a decantar la balanza. Los últimos estudios genéticos favorecen a la hipótesis de la estepa. Anthony y un equipo internacional de expertos en ADN antiguo secuenciaron muestras de material genético de 69 europeos que vivieron hace entre 8000 y 3000 años, incluidos 9 esqueletos de yacimientos de la cultura yamnaya, en la actual Rusia, y compararon las muestras de ADN con las de cuatro esqueletos de la posterior cultura de la cerámica cordada, de Europa central.

Asombrosamente, el pueblo de la cerámica cordada, cuya cultura se extendió por Europa hasta puntos tan lejanos como Escandinavia, tenía hasta tres cuartas partes de su progenie en el pueblo yamnaya, y esta huella genética de los yamnaya todavía puede encontrarse en muchos europeos en la actualidad. Así que es cierto que los yamnaya, y con ellos sus genes y posiblemente su lengua, salieron de las estepas en un número considerable hace probablemente unos 4500 años. Pontus Skoglund, experto en ADN antiguo de la facultad de medicina de Harvard, que no participó en el artículo pero que trabaja en el laboratorio de uno de sus autores, señala que tales resultados constituyen una clara prueba de que hubo migraciones masivas desde las estepas. Los resultados, añade, equilibran la lid entre ambas hipótesis.

A no ser, claro está, que esta migración fuera una ola «secundaria» que trajo consigo lenguas indoeuropeas posteriores, pero no el protoindoeuropeo, la lengua madre original. Esta interpretación, el contraataque de los partidarios de la hipótesis de Anatolia, concordaría con las conclusiones del estudio de 2003 de Gray, que apuntó hacia la posibilidad de una migración más tardía desde las estepas.

¿Sabremos alguna vez quién lleva la razón? Algunos indicios recientes, basados en ADN antiguo, de que los pueblos de las estepas se expandieron hace unos 4700 años hacia el este, hasta Siberia, podrían vencer una de las objeciones clave de Renfrew a la hipótesis de la estepa; sin embargo, no aportan ningún indicio sobre qué lenguas les acompañaron. Solo una cosa está clara: los investigadores continuarán debatiendo sobre esta cuestión en cualquiera que sea la lengua que les legaron sus ancestros. IyC

PARA SABER MÁS

Language-tree divergence times support the anatolian theory of indo-european origin. Russell D. Gray y Quentin D. Aktinson en *Nature*, vol. 426, págs. 435-439, noviembre de 2003.

Indo-european languages tied to herders. Michael Balter y Ann Gibbons en *Science*, vol. 347, págs. 814-815, febrero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Diversidad lingüística del mundo. Colin Renfrew en *IyC*, marzo de 1994.

Orígenes de las lenguas indoeuropeas. Colin Renfrew en *IyC*, diciembre de 1989, y en «El lenguaje humano», colección Temas de *IyC*, n.º 5, 1996.

¿Cómo llegaron a Europa las lenguas indoeuropeas? Ruth Berger en *IyC*, enero de 2011.

El ADN antiguo arroja luz sobre el debate de las lenguas indoeuropeas. John Novembre en *IyC*, noviembre de 2015.

CONSERVACIÓN

El impacto humano en las aves migratorias

Las aves migratorias son especialmente sensibles a la actividad humana. La preservación de sus circuitos no se logrará sin una adecuada cooperación internacional

José Luis Tellería

EL PASO DE LAS ESTACIONES PRODUCE CAMBIOS AMBIENTALES A LOS QUE SON MUY SENSIBLES LOS animales. Así, las variaciones en la temperatura y la humedad determinan el crecimiento de las plantas y la cantidad de biomasa que estas producen, de lo cual dependerán la abundancia y la disponibilidad del alimento para los animales. Muchos de ellos han desarrollado una estrategia para responder a estas modificaciones del entorno: realizan desplazamientos cíclicos que los llevan, con periodicidad anual, hacia las áreas más adecuadas para la reproducción. Esta respuesta viajera a la estacionalidad del medio es lo que conocemos como migración.

Las aves son uno de los grupos de animales que afrontan con mayor eficacia los desplazamientos migratorios gracias a sus adaptaciones al vuelo. De este modo, el charrán ártico (*Sterna paradisaea*) vuela sobre el océano Atlántico en un circuito de 70.000 kilómetros entre los polos boreal (donde cría) y austral (donde veranea). El ánsar indio (*Anser indicus*) migra sobre el Himalaya a más de 8000 metros de altitud en condiciones de escasez extrema de oxígeno. Y las collalbas grises de Groenlandia (*Oenanthe oenanthe leucorhoa*) parecen cubrir, en un único viaje, los 4000 kilómetros que las separan de sus cuarteles africanos.

Gracias a esta facilidad de movimientos, las aves rastrean a escala planetaria las variaciones en la disponibilidad de recursos. De hecho, la mayor parte de las especies migratorias se desplazan para criar en altas latitudes durante los veranos boreal o austral y, llegado el otoño, se retiran hacia los trópicos. La alta productividad de los hábitats elegidos para la reproducción



LAS GRANDES BANDADAS DE GRULLAS, procedentes del centro y norte de Europa, surcan los cielos para invernar en la península ibérica. La pérdida o degradación de su hábitat constituye la principal amenaza para sus poblaciones.

José Luis Tellería es profesor de zoología de la Universidad Complutense de Madrid, donde se centra en el estudio y la conservación de los vertebrados terrestres. Se interesa por los factores que determinan la distribución de las especies y en cómo aplicar ese conocimiento a la conservación.



significa que hallarán unos recursos más abundantes (como invertebrados ricos en proteínas), lo que se traducirá en la producción de más huevos, la crianza de pollos mejor alimentados y una mayor supervivencia de la progenie.

Ahí reside el secreto del viaje, la ventaja que compensa la mortalidad asociada a los peligros de una vida itinerante. Hoy se calcula que unas 1600 de las 10.000 especies de aves del planeta realizan estos movimientos estacionales, un porcentaje que aumenta en los sectores más norteños de Eurasia y Norteamérica. Solo en Europa, el 84 por ciento de sus 340 especies de aves son migratorias.

Sin embargo, en las últimas décadas se ha registrado en todo el mundo un descenso generalizado en las cifras de aves que se desplazan. Este fenómeno, que afecta a numerosas especies, se ha atribuido al impacto de las actividades humanas, entre ellas la pérdida de hábitat, la caza y el cambio climático. La supervivencia de algunas aves se halla amenazada por estas causas; si deseamos salvarlas, es preciso emprender una acción decidida a gran escala. Pero, para establecer estrategias de conservación eficaces, se necesita disponer antes de un diagnóstico de su situación. Debemos conocer con detalle los problemas que acosan a las aves. No solo los que alteran sus rutas migratorias y los lugares donde realizan escalas, sino también los que afectan al momento y la periodicidad de los desplazamientos.

Por este motivo, junto con mi equipo de investigación, estamos estudiando las aves migratorias en la península ibérica y el Magreb, unas zonas muy importantes para los movimientos y la supervivencia invernal de la avifauna europea. Resulta fundamental conocer los factores que determinan la distribución y la abundancia de esas especies con el fin de diseñar medidas útiles para su conservación. En concreto, nos interesa evaluar los efectos de la alteración de ciertos hábitats que son relevantes para esas aves, velar por la protección de sus corredores migratorios y analizar las posibles consecuencias del cambio climático en las zonas de invernada.

AVES VIAJERAS EN PELIGRO

La avifauna europea se mueve dentro del sistema migratorio paleártico-africano. Este incluye a las especies que crían en la mitad occidental de Eurasia y que, tras beneficiarse del pulso productivo norteño, viajan hacia el sur para pasar el invierno. Estas aves migratorias se dividen en dos grupos según el alcance de sus movimientos: las transaharianas y las presaharianas. Las primeras penetran por el valle del Nilo hasta el África oriental-austral, o cruzan el Sáhara para invernar en el Sahel, esa franja de vegetación dispersa que se extiende al sur del desierto. Su llegada a los campos de invernada africanos coincide con el inicio de la primavera austral o con el fin de las lluvias monzónicas, que tienen lugar entre junio y septiembre y restañan los limitantes efectos de la sequía. Por otro lado, las aves migratorias presaharianas se mueven hacia las costas atlánticas buscando el efecto atemperador del mar, o se desplazan hasta la cuenca mediterránea, donde las lluvias otoñales han iniciado un período de reverdecimiento generalizado, con un aumento de la actividad de muchos invertebrados y una alta disponibilidad de frutos y semillas. De esta forma, las aves migratorias europeas rastrean la complementariedad productiva entre las áreas de cría e invernada, algo que también ocurre en los sistemas migratorios de Asia centro-oriental y de las Américas.

Pero las aves vuelan en busca de unos recursos de un planeta que está cambiando por la creciente intervención humana. Esto parece haber afectado ya a algunas especies. Según cálculos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, el 10 por ciento de las 582 aves migratorias del sistema Paleártico-Africano, el 8 por ciento de las 819 que se mueven por América y el 14 por ciento de las 728 que surcan los cielos de Asia oriental se encuentran en una situación delicada.

Hay, además, datos concluyentes sobre la reducción numérica generalizada de la mayoría de estas especies. En nuestro continente, el seguimiento interanual de aves comunes coordinado por el Consejo Europeo para el Censo de Aves (EBCC, por sus siglas en inglés) refleja cómo el escribano hortelano (*Emberiza hortulana*), la tórtola común (*Streptopelia turtur*), la tarabilla norteña (*Saxicola rubetra*), el ruiseñor común (*Luscinia megarhynchos*) y muchas otras especies migratorias transaharianas han sufrido pérdidas que oscilan entre el 60 y el 80 por ciento de los efectivos que se reproducían en Europa hace treinta años. Dado que estos resultados son similares a los obtenidos por el Programa de Seguimiento de las Aves Reproductoras de Norteamérica (BBS), todo indica que la pérdida de aves migratorias constituye un fenómeno global. Pero si pretendemos atenuar o revertir el declive de estas especies, antes deberemos elaborar un diagnóstico sobre lo que les ocurre exactamente como paso previo a la adopción de medidas de conservación.

EN SÍNTESIS

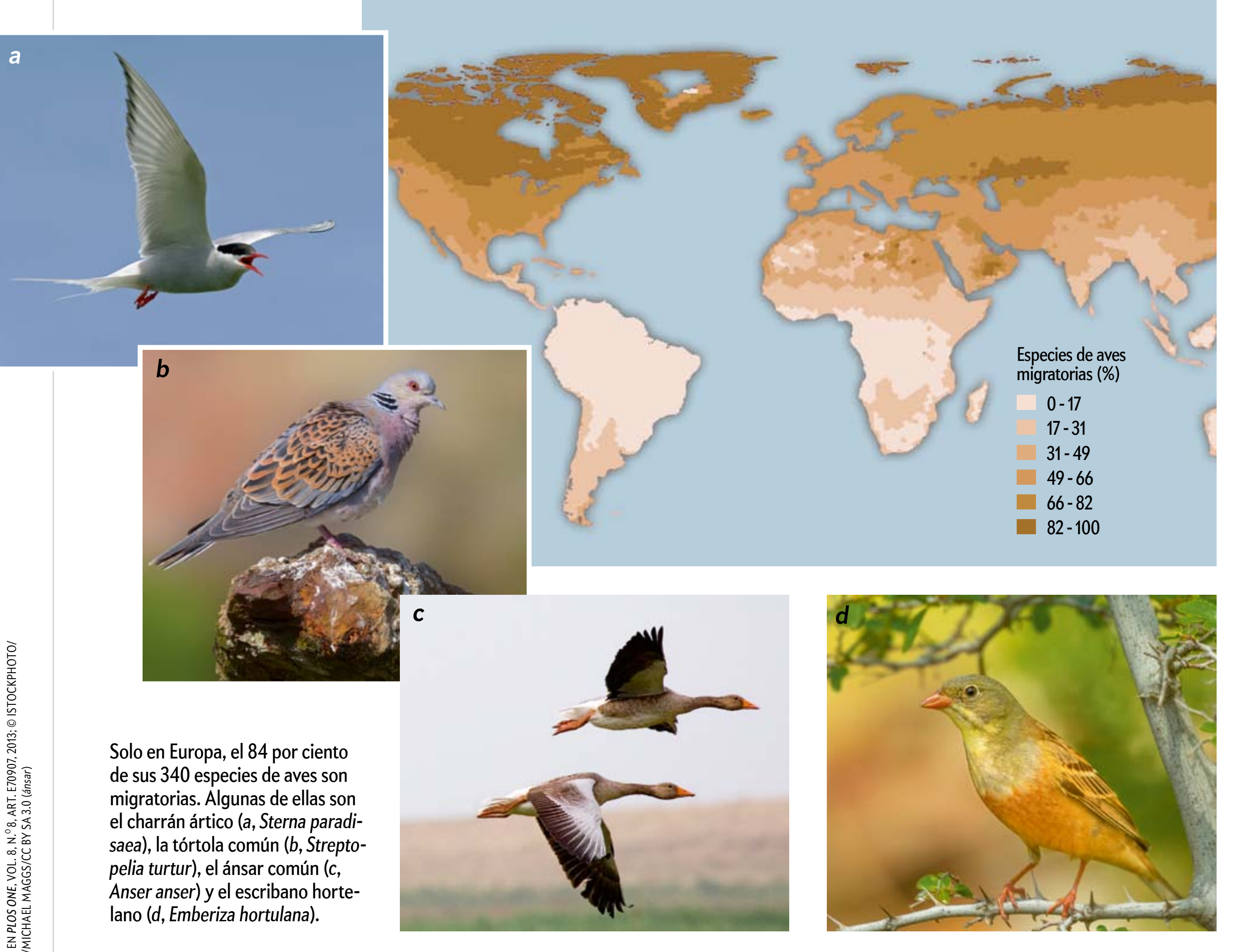
En las últimas décadas se ha registrado un declive generalizado en numerosas especies de aves migratorias, lo que se ha atribuido al impacto provocado por las actividades humanas, como la pérdida de hábitat, la caza y el cambio climático.

Si se tiene en cuenta que el 84 por ciento de las aves europeas se desplazan a otras zonas para reproducirse o invernar, necesitamos disponer de un conocimiento detallado sobre su situación actual para proteger sus poblaciones.

La gestión de las aves migratorias orientada a su conservación representa un reto complejo debido a las peculiaridades de su vida itinerante. Se necesitan acuerdos internacionales que sustenten la protección de este grupo, así como una base social que la respalde.

¿Dónde hay más aves migratorias?

De las alrededor de 10.000 especies de aves que existen en todo el mundo, 1600 realizan movimientos migratorios siguiendo los cambios estacionales. La proporción de aves migratorias en los hábitats de cría aumenta con la latitud, donde las diferencias climáticas entre estaciones son más marcadas. Los valores máximos se alcanzan en el hemisferio norte, que concentra la mayor parte de la superficie terrestre emergida.



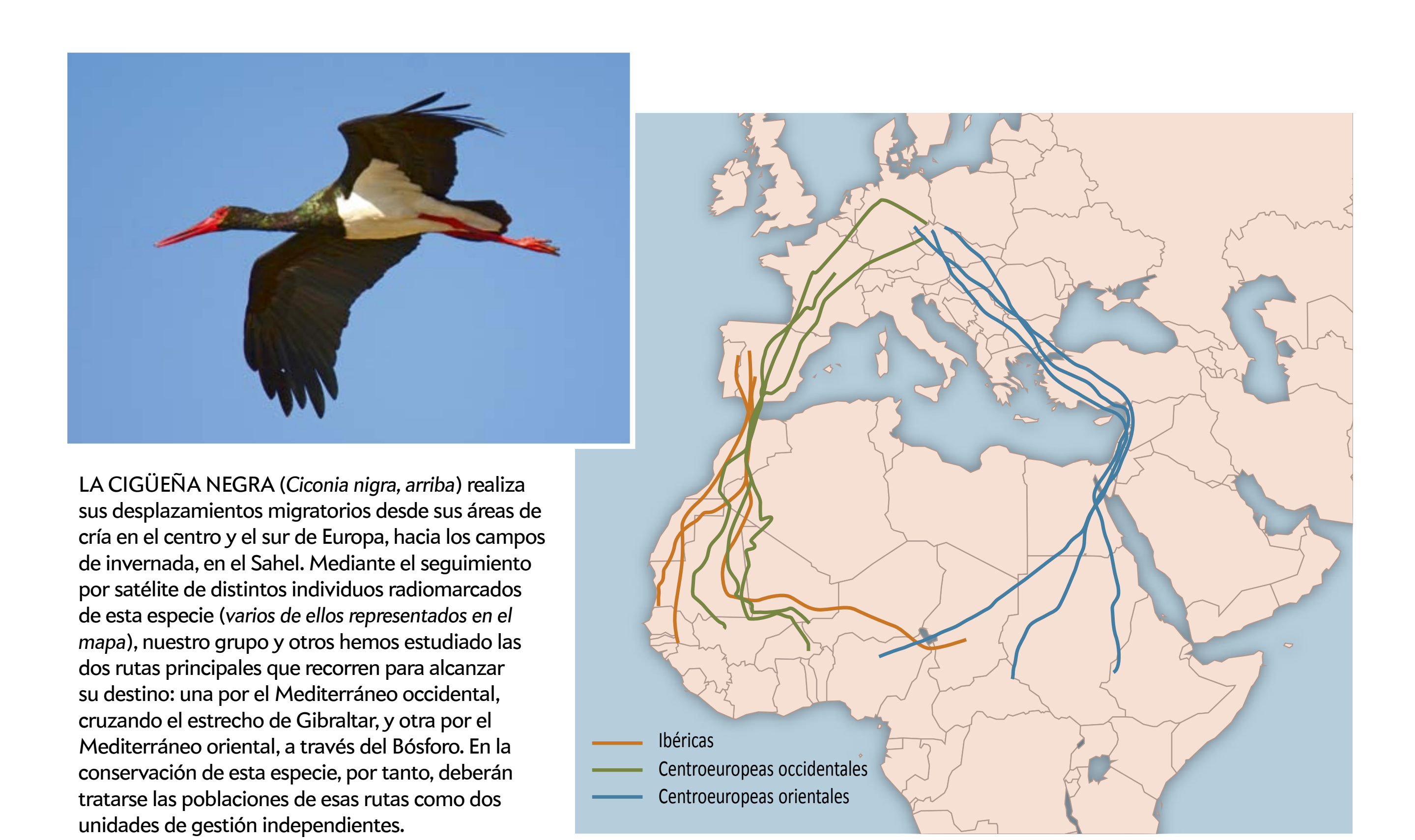
Solo en Europa, el 84 por ciento de sus 340 especies de aves son migratorias. Algunas de ellas son el charrán ártico (*a*, *Sterna paradisaea*), la tórtola común (*b*, *Streptopelia turtur*), el ánsar común (*c*, *Anser anser*) y el escribano hortelano (*d*, *Emberiza hortulana*).

ELEMENTOS PARA UN DIAGNÓSTICO

Las aves migratorias se mueven entre áreas de cría e invernada siguiendo unos itinerarios concretos que incluyen escalas periódicas donde pueden recuperar energías (su fisiología les permite acumular grasa en muy poco tiempo). Un primer paso para la protección de estos animales es conocer esos circuitos de forma detallada, pues solo así podremos ubicar en el espacio y en el tiempo los problemas que les acosan.

Con tal objeto se han anillado millones de aves en programas coordinados internacionalmente, como el programa europeo Euring. En los últimos tiempos se usa también el seguimiento de las aves mediante satélites o geolocalizadores, que brindan unos resultados tan informativos como espectaculares. Cabe destacar los recogidos a escala mundial por el banco de datos Movebank o, en España, por el programa de la Sociedad Española de Ornitología (SeoBirdlife). El análisis de toda esta información ha permitido identificar tres rasgos de estos circuitos migratorios que pueden ayudarnos a comprender su vulnerabilidad y los particulares retos para su conservación.

El primero ellos hace referencia a la *conectividad*, esto es, la fortaleza del vínculo entre las aves migratorias y los territorios por los que se mueven. Cuando la conectividad es alta, las aves ocupan cada año los mismos lugares de cría e invernada, e incluso descansan en los mismos lugares de paso. Se supone que esta fidelidad está relacionada con el mejor conocimiento del terreno por parte del ave, lo que repercute a su vez en una búsqueda más eficaz del alimento o una mayor protección frente a los depredadores y otros peligros durante los viajes. Sin embargo, no resulta infrecuente que distintas poblaciones de una misma especie se desplacen por circuitos migratorios diferentes.



LA CIGÜEÑA NEGRA (*Ciconia nigra, arriba*) realiza sus desplazamientos migratorios desde sus áreas de cría en el centro y el sur de Europa, hacia los campos de invernada, en el Sahel. Mediante el seguimiento por satélite de distintos individuos radiomarcados de esta especie (*varios de ellos representados en el mapa*), nuestro grupo y otros hemos estudiado las dos rutas principales que recorren para alcanzar su destino: una por el Mediterráneo occidental, cruzando el estrecho de Gibraltar, y otra por el Mediterráneo oriental, a través del Bósforo. En la conservación de esta especie, por tanto, deberán tratarse las poblaciones de esas rutas como dos unidades de gestión independientes.

Por ejemplo, las cigüeñas negras (*Ciconia nigra*) se dividen, como muchísimas otras aves europeas, entre las que cruzan el Mediterráneo bien por el Bósforo o bien por Gibraltar para invernar luego en sectores orientales u occidentales del Sahel. Lo que ocurra en uno de los itinerarios no tiene por qué afectar al otro, por lo que, desde una perspectiva conservacionista, las poblaciones asociadas a tales rutas deben ser vistas como unidades de gestión diferenciadas.

La *dispersión migratoria* constituye un segundo rasgo de la migración. Se define como la desigual superficie de las áreas ocupadas por las aves en sus desplazamientos. De este modo, una zona de invernada de escasa superficie puede restringir el tamaño de toda la población implicada en ese circuito pese a que disponga de extensas áreas de cría. El efecto se producirá igualmente si la situación es inversa, con una zona limitada de cría y una superficie grande de invernada. Este fenómeno se ha observado en la mayoría de las aves migratorias europeas y americanas. Se ha comprobado, además, que una restricción en el tamaño de esas áreas aumenta en gran medida la vulnerabilidad de las poblaciones. Así, una acumulación progresiva de perturbaciones en un área reducida puede repercutir pronto en una parte importante de la población. Tal problema resulta muy evidente en las aves acuáticas, que se concentran en unos pocos lugares fuera de la época de cría. Pensemos, por ejemplo, en Doñana, que alberga el 44 por ciento de los ánsares comunes (*Anser anser*) invernantes en España. Este espacio, junto con solo tres enclaves más (las lagunas de Villafáfila, en Zamora, y las de Boada y de la Nava, en Palencia) acaparan el 88 por ciento de esta población de aves. El deterioro de cualquiera de estos lugares puede comprometer la invernada de los ánsares en nuestro país.

El tercer rasgo destacable de la migración son los *efectos de transferencia*, que se refieren al traslado de las restricciones o ventajas experimentadas por las aves entre diferentes sectores de su circuito migratorio. Por ejemplo, la candelita norteña (*Setophaga ruticilla*) es un pajarito que cría en Norteamérica y que pasa el invierno en Mesoamérica y Sudamérica. Se ha observado que los individuos que invernan en territorios de alta calidad migran antes y se reproducen mejor que los de hábitats peores. Esto se ha comprobado también en varias especies de gansos cuya reproducción en las áreas de cría está condicionada por la capacidad de las hembras para engordar en las áreas de paso primaveral. La enseñanza conservacionista de esta concatenación de hechos es sencilla: la reducción numérica de las aves migratorias suele ser el resultado de los impactos sufridos en diferentes lugares y momentos, por lo que solo su estudio conjunto nos permitirá diagnosticar los problemas de su conservación.

LOS IMPACTOS HUMANOS

Las aves migratorias sufren el impacto de las actividades humanas a lo largo de todo su circuito migratorio. Cabe discriminar los efectos según se trate de las áreas de cría e invernada o de los lugares de paso. Aunque las agresiones pueden ser múltiples y variar según las peculiaridades de cada especie, no es difícil agruparlas en una serie de categorías.

La pérdida de hábitat constituye una agresión importante para las aves y, según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, representa el principal factor que amenaza la conservación de las especies. La causa primordial de la pérdida de hábitat es el crecimiento demográfico humano (hoy sumamos 7400 millones de personas) y la consiguiente ocupación y explotación del entorno. Estamos transformando el planeta a través de la deforestación, la desecación de las zonas húmedas o la expansión urbana en un proceso que afecta profundamente al resto de las especies. Las aves migratorias no se libran de este impacto, que resulta especialmente relevante en ellas porque puede afectarlas en cualquier punto de su circuito migratorio.

Asia ofrece varios ejemplos de tal amenaza. El rápido crecimiento económico del continente ha puesto en peligro al 80

FUENTES: AFRICAN ODYSSEY PROJECT-SATELLITE TRACKING OF BLACK STORKS *CICONIA NIGRA* BREEDING AT A MIGRATORY DIVIDE, POR M. BOBEK ET AL. EN *JOURNAL OF AVIAN BIOLOGY*, VOL. 39, N.º 5, PÁGS. 500-506, 2008; CONSERVATION OF IBERIAN BLACK STORKS (*CICONIA NIGRA*) OUTSIDE BREEDING AREAS: DISTRIBUTION, MOVEMENTS AND MORTALITY., POR L. S. CANO ET AL. EN *BIRD CONSERVATION INTERNATIONAL*, VOL. 23, N.º 4, PÁGS. 463-468, 2013; © IMNATURE/ISTOCKPHOTO (*cigüeña*)

por ciento de sus zonas húmedas. De hecho, ha destruido ya cerca de la mitad de las zonas intermareales de China y Corea del Sur utilizadas por las limícolas (chorlitos, agujas, correlimos...) en sus movimientos estacionales. Además, esta pérdida de hábitat está alterando en gran medida las áreas de cría e invernada de la mayoría de las aves migratorias. En América, la destrucción o degradación de los bosques parece haber perjudicado a los pájaros que migran entre los dos subcontinentes, ya que, en su mayoría, son especies forestales. En Europa, la intensificación agrícola, que conlleva un mayor uso de plaguicidas, una menor variedad paisajística y la eliminación de setos, entre otros factores que desfavorecen a las aves, se halla detrás de la disminución de numerosas especies migratorias transaharianas de Eurasia y del Sahel, adaptadas a vivir en hábitats menos forestales que las americanas. En el Sahel, que constituye una importante zona de invernada, se asiste, además, a la degradación de los bosques y sabanas por el creciente impacto de la deforestación y el sobrepastoreo en un contexto de sequía creciente.

La caza es considerada, tras la pérdida de hábitat, la segunda amenaza más importante para la conservación de las aves. Estas se cazan en zonas donde los animales salvajes constituyen una parte esencial de la dieta de sus habitantes, pero también se las captura para venderlas como mascota o por puro deporte. No se conoce bien el impacto que ejerce esta actividad sobre las poblaciones de aves migratorias, aunque se supone que es relevante, dado que se las captura masivamente cuando se concentran en determinadas zonas de paso o invernada. Se calcula así que hay unos 700 kilómetros de redes instaladas en las costas del norte de África para interceptarlas en su paso migratorio. Un estudio coordinado por Anne Laure Brochet, de BirdLife International, en el que han colaborado más de cincuenta investigadores, ha estimado que en la región mediterránea se cobran ilegalmente entre 11 y 36 millones de aves cada año (no se dispone de datos sólidos sobre qué porcentaje representan esas cifras respecto al total de las aves que migran). Se trata de una caza no selectiva que afecta a pajarillos, aves acuáticas o rapaces.

No hay ningún país que se libre de esta actividad, incluidos los de la Unión Europea, aunque las crecientes restricciones legales parecen haber desplazado el grueso del problema hacia el Mediterráneo oriental. De los 159 puntos negros donde se cazan más de 100.000 aves al año (señalados por el estudio de BirdLife arriba mencionado), solo 20 localidades, situadas en Chipre, Egipto, Líbano y Siria, son responsables del 34 por ciento de las capturas en todo el Mediterráneo. Entre estas aves abundan las que pasan el invierno en la región mediterránea, como los petirrojos (*Erithacus rubecula*), las currucas capirotadas (*Sylvia atricapilla*) o los zorzales (*Turdus philomelos*, *Turdus iliacus*). Se sabe menos sobre lo que ocurre en otros lugares, aunque sí hay información sobre el impacto de la caza en algunas poblaciones de aves acuáticas que invernan en el Sahel. En concreto, en un estudio liderado por Juliet Vickery, de la Real Sociedad para la Protección de las Aves, del Reino Unido, sobre las posibles causas del declive de las aves del Sahel, se ha descrito que en el delta interior del Níger-Bani se cazan anualmente entre 1800 y 27.000 cercetas carretonas (*Anas querquedula*) y entre 20.000 y 80.000 combatientes (*Philomachus pugnax*). Tales cifras suponen, respectivamente, del 1 al 15 por ciento y del 15 al 60 por ciento de los efectivos que habitualmente invernan en esa zona. En un estudio coordinado por Luis S. Cano, de la Universidad Complutense de Madrid, hemos obtenido pruebas similares sobre el impacto de la caza en algunas especies amenazadas. Hemos observado así que cinco de las siete jóvenes cigüeñas negras ibéricas que marcamos con radioemisores para estudiar su migración a África fueron cazadas al llegar al Sahel.

El cambio climático es otro factor que está afectando a las condiciones de vida de las aves migratorias. En muchas localidades norteñas se han atemperado las condiciones invernales, por lo que ciertas poblaciones de aves han dejado de moverse hacia el sur. Los vuelos migratorios conllevan ciertos costos para el animal (esfuerzo metabólico, mortalidad asociada a los viajes, etcétera) que se compensarán por los beneficios de la ocupación itinerante de áreas donde se maximiza la supervivencia y el éxito reproductivo. No debe extrañarnos entonces que, si no sucede así, las aves consideren más rentable no viajar hacia el sur y los individuos sedentarios terminen dominando en las poblaciones. Hay que indicar, además, que el comportamiento migratorio puede ser muy flexible, de forma que, en determinadas especies, un mismo individuo puede optar por desplazarse un año





UNA DE LAS AMENAZAS más importantes para las aves es la degradación del hábitat, como la que sucede en el Sahel a causa de la deforestación y el sobrepastoreo (*izquierda*). Esta afecta negativamente a las aves que, como la collalba rubia (*Oenanthe hispanica*) tienen allí su zona de invernada (*derecha*).

y quedarse otro. De esta forma, sobre un sustrato biológico tan maleable, asistimos hoy a una reorganización de los movimientos migratorios en todo el planeta.

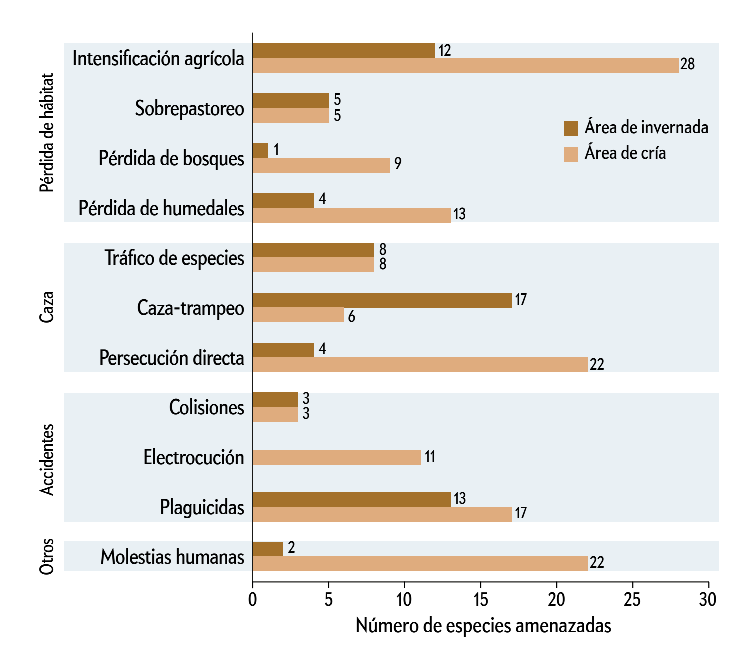
El calentamiento ha acelerado la actividad primaveral de plantas y animales, con lo que las fechas de llegada a las áreas de cría de muchas aves migratorias se está adelantando. Para ellas es importante solapar su reproducción con los máximos productivos de sus hábitats de cría, pues recordemos que, cuanta más comida haya, mayor será el éxito reproductivo. Las investigaciones realizadas hasta la fecha al respecto aportan resultados interesantes. Un análisis de la evolución de las poblaciones de cien especies de aves europeas en el período 1990-2000, coordinado por Anders Møller, de la Universidad Pierre y Marie Curie de París, demostró que aquellas que no habían adelantado las fechas de llegada presentaban un mayor declive numérico, resultado probable de su incapacidad para criar bien. Y otro estudio similar realizado por Christiaan Both, de la Universidad de Groningen, y otros investigadores sobre medio centenar de aves holandesas concluyó que les iba peor a las que criaban en los hábitats con los pulsos productivos cortos, como los bosques, al serles más difícil adaptarse a sus cambios. En este estudio salían particularmente malparadas las aves transaharianas, probablemente porque al vivir muy alejadas de las áreas de cría tienen dificultades para percibir la evolución de la primavera y acertar con el óptimo productivo de cada año en la zona de reproducción. Es resumen, las aves están ajustando su comportamiento a un nuevo escenario con resultados desiguales.

Finalmente, el cambio climático provoca muchas de las modificaciones en la calidad del hábitat de las aves migratorias. Se ha observado así que los monzones resultan cada vez menos intensos en el Sahel, lo que altera la productividad de los hábitats y el estado y el nivel de agua de sus humedales. Las predicciones de cambio climático para la región mediterránea también anuncian una mayor escasez e irregularidad de las precipitaciones, con idénticas secuelas sobre su capacidad para recibir aves invernantes. Un estudio coordinado por el autor del presente artículo predice, por ejemplo, un deterioro, a causa de la sequía, de la capacidad de acogida de aves migratorias en numerosas áreas meridionales de la península ibérica y, especialmente, del Magreb. En todos estos casos se generan, además, sinergias dañinas como consecuencia de la intensificación del uso humano de unos territorios cada vez más improductivos.

Los accidentes que sufren las aves migratorias debido a las actividades humanas constituyen otra causa que contribuye a su declive. Gracias al vuelo, las aves sortean en sus migraciones obstáculos insalvables para otros animales. Pero también tienen el riesgo de colisionar con edificios, torres de telefonía, tendidos eléctricos o campos eólicos. De este modo, un estudio sobre la ubicación de los campos eólicos en España realizado por el autor ha revelado que la densidad de estos estaba aumentando en el corredor migratorio pirenaico-occidental, por donde penetran muchas de las aves europeas que alcanzan la península ibérica camino de sus áreas de invernada. Se ha calculado que estas colisiones, que ocurren en situaciones de poca visibilidad, eliminan unos 700 millones de aves al año en Estados Unidos. Los datos disponibles sugieren, además, una interferencia creciente de estas estructuras en la migración dada la rápida implantación de antenas y tendidos en muchas zonas del planeta. En Estados Unidos, se ha calculado que la mortalidad media anual a causa de las antenas de comunicación ascendió de 1,3 millones de aves en la década de los setenta, a entre 4 y 5 millones (en su mayoría migrantes nocturnos) en el año 2000. Estas estructuras originan, además, otros problemas, como los relacionados con los campos electromagnéticos. Las aves se orientan por diferentes procedimientos, como la memorización de ciertos hitos geográficos o la disposición del sol y las estrellas, pero también utilizan el campo magnético terrestre. Se ha comprobado que se desorientan al someterse a campos electromagnéticos artificiales, por lo que es probable que la expansión y densificación de esas estructuras terminen por afectar a las aves migratorias a lo largo de sus desplazamientos.

MEDIDAS PARA LA CONSERVACIÓN

Las aves migratorias, como el resto de las especies, están amenazadas por la acumulación de perturbaciones atribuibles a la actividad humana. Por eso, cualquier iniciativa dirigida a





RAPACES EN PELIGRO: En las aves migratorias de este grupo (órdenes Accipitriformes y Falconiformes) de Eurasia y África, como el alcotán europeo (*Falco subbuteo*, *arriba*), se ha estudiado el número de especies afectadas por distintos impactos en las áreas de cría e invernada (*izquierda*). La intensificación agrícola, la caza y las molestias humanas parecen ser las principales amenazas para las especies en las áreas de cría, mientras que la caza destaca por su impacto en las zonas de invernada.

GRÁFICA ELABORADA A PARTIR DE LOS DATOS DE «KEY CONSERVATION ISSUES FOR MIGRATORY LAND-AND WATERBIRD SPECIES ON THE WORLD'S MAJOR FLYWAYS», POR J. KIRBY ET AL. EN *BIRD CONSERVATION INTERNATIONAL*, VOL. 18, S1, PÁGS. S49-S73, 2008; WIKIMEDIA COMMONS CC BY SA 3.0 (*alcotán*)

INFORMACIÓN SOBRE AVES MIGRATORIAS EN LA WEB:

Las aves migratorias y su estado de conservación

BirdLife International. Biología, distribución y conservación de las aves migratorias: **www.birdlife.org**

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Clasificación de las especies según su estado de conservación: **www.iucnreslist.org**

El estudio de la migración

Programa de Seguimiento de Aves Comunes Paneuropeo, responsable de coordinar los controles interanuales del estado numérico de las poblaciones de aves en Europa: **www.ebcc.info**

Programa de Seguimiento de las Aves Reproductoras de Norteamérica: **www.pwrc.usgs.gov/bbs**

Programa Euring. Coordina la actividad de las centrales de anillamiento de Europa: **www.euring.org**

Página del Instituto Max Planck de Ornitología con información sobre los itinerarios seguidos por animales marcados: **www.movebank.org**

Página de la Sociedad Española de Ornitología-BirdLife con información sobre la migración de las aves españolas: **www.migraciondeaves.org**

Bases de datos

Proyecto eBird de ciencia ciudadana promovido por el Laboratorio de Ornitología de la Universidad Cornell. Registros de aves recogidos en todo el planeta: **ebird.org/content/ebird**

Proyecto de Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad. Ubicación de los registros de todas las especies del planeta. Incorpora periódicamente los datos de Euring y eBird: **www.gbif.org**

Iniciativas internacionales de conservación

Convención Internacional para la conservación de las Especies Migratorias de Animales Salvajes (Convenio de Bonn): **www.cms.int**

Acuerdo Euro-Asiático para la Conservación de las Especies Migratorias de Aves Acuáticas: **www.unep-aewa.org**

Convenio relativo a la Conservación de la Vida Silvestre y del Medio Natural en Europa (Convenio de Berna): **www.coe.int/es/web/bern-convention**

Convenio relativo a los Humedales de Importancia Internacional (Convenio de Ramsar): **www.ramsar.org**

mantener la diversidad biológica del planeta ayudará a conservarlas. Sabemos, sin embargo, que la gestión de estas aves es complicada por las peculiaridades de su vida itinerante y por la necesidad de una colaboración entre países con recursos o sensibilidades diferentes. Por esa razón, resultan de gran importancia los acuerdos internacionales dirigidos a la protección de las especies migratorias. Estos pueden ser de carácter general, como la Convención Internacional sobre la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Salvajes (CMS), o estar dirigidos a la protección de ciertos grupos, como el Acuerdo Euroasiático para la Conservación de las Especies Migratorias de Aves Acuáticas (AEWA).

Sobre estas bases legales, que comprometen a todos los países signatarios de tales acuerdos, hay una serie de enfoques complementarios con los que paliar en la medida de lo posible el declive generalizado de estas especies. En primer lugar, se necesita extender a otras partes del planeta el seguimiento interanual de las poblaciones de aves migratorias, tal como el que ya se hace en Europa y América del Norte. Solo de esta forma es posible detectar las pérdidas de efectivos antes de que la situación resulte irreversible. Por otra parte, el seguimiento es fundamental para evaluar los efectos de las medidas de conservación. Sin datos de este tipo, la conservación se hace a ciegas.

En segundo lugar, resulta importante controlar el impacto de la caza de las aves migratorias sobre determinadas especies o poblaciones, en especial en aquellas zonas donde se producen matanzas incontroladas e injustificables de estos animales. El Mediterráneo es una zona caliente donde hay que trabajar mucho para cambiar ciertas tradiciones cinegéticas incompatibles con una visión moderna de la conservación de las aves. En este sentido, la CMS promueve el trabajo de diferentes grupos de trabajo dirigidos a atajar este problema.

En tercer lugar, se debe continuar trabajando en la atenuación del impacto de ciertas infraestructuras sobre las aves, un campo en el que ya se han realizado progresos importantes gracias a la aplicación de medidas para prevenir colisiones y electrocuciones en los tendidos. En este sentido, habría que evitar la densificación de estas estructuras en aquellas zonas de paso donde coinciden los flujos migratorios o las agrupaciones invernales de muchas especies.

Por último, hay que promover la creación de redes de reservas que garanticen la protección de los hábitats de las aves a lo largo de sus circuitos migratorios. Es urgente identificar los cuellos de botella donde las poblaciones están más constreñidas o son más vulnerables al efecto puntual de ciertas perturbaciones. Este es el caso de las áreas de descanso a lo largo de las rutas migratorias de las aves acuáticas (patos, gansos, limícolas, etcétera), según ha informado la AEWA.

La conservación de las aves migratorias es, sin duda, un reto complejo que solo podrá conseguirse si hay una base social que lo sustente. Por eso, resulta importante que aquellos ciudadanos dispuestos a conservar este legado natural apoyen las iniciativas dirigidas a protegerlas. IyC

PARA SABER MÁS

Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining. A. P. Møller, D. Rubolini y E. Lehikoinen en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, n.º 42, págs. 16195-16200, 2008.

Potential impacts of wind farms on migratory birds crossing Spain. J. L. Tellería en *Bird Conservation International*, vol. 19, n.º 2, págs. 131-136, 2009.

Avian population consequences of climate change are most severe for long-distance migrants in seasonal habitats. C. Both et al. en *Proceedings of the Royal Society of London*, Serie B, vol. 277, págs. 1259–1266, 2010.

Conservation of iberian black storks (*Ciconia nigra*) outside breeding areas: distribution, movements and mortality. L. S. Cano et al. en *Bird Conservation International*, vol. 23, n.º 4, págs. 463-468, 2013.

The decline of Afro-Palaearctic migrants and an assessment of potential causes. J. A. Vickery et al. en *Ibis*, vol. 156, n.º 1, págs 1-22, enero de 2014.

Effect of climate change on mediterranean winter ranges of two migratory passerines. J. L. Tellería, J. Fernández-López y G. Fandos en *PLoS ONE*, vol. 11, n.º 1: e0146958, 2016.

Preliminary assessment of the scope and scale of illegal killing and taking of birds in the Mediterranean. A. L. Brochet et al. en *Bird Conservation International*, vol. 26, n.º1, págs. 1-28, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los pájaros de las dehesas. Biodiversidad e invernada en un sistema modificado por el ser humano. José L. Tellería en *IyC*, junio de 2004.

Ornitología participativa. Hillary Rosner en *IyC*, junio de 2013.



EN MALAWI, Rhoda Mang'yana ha logrado aumentar de forma notable su cosecha de maíz plantando árboles cuyas raíces y hojarasca reconstruyen el suelo.

UNA CURA PARA EL SUELO DE ÁFRICA

La ínfima calidad del suelo devasta enormes áreas de África. Plantar árboles y arbustos perennes entre los cultivos permite regenerarlo y, al mismo tiempo, aumentar las cosechas

John P. Reganold y Jerry D. Glover

Mariko Majoni, agricultor de Malawi, ha cambiado radicalmente su forma de cultivar la tierra. Al igual que muchos minifundistas africanos, no podía permitirse adquirir abonos, por lo que con los años sus cosechas de maíz mermaron de forma considerable. Cuando se enteró de la existencia de «árboles-abono», que captan nitrógeno de la atmósfera, repartió plantones entre sus hileras de maíz. Al cabo de seis años, la cosecha era diez veces mayor, producía lo suficiente para su familia y un excedente para vender. Al principio sus vecinos creyeron que se había vuelto loco, pero ahora muchos han adoptado los mismos procedimientos.

En buena parte del África subsahariana las temperaturas son cálidas, y los días, largos y soleados. Las plantas cultivadas tendrían que crecer bien allí, pero los agricultores se las ven y se las desean para lograrlo, aunque empleen abonos sintéticos. Las cosechas de maíz consiguen, de media, una tonelada por hectárea, apenas la décima parte de lo que obtienen los productores del Medio Oeste estadounidense. La razón es simple: gran parte del suelo al sur del Sáhara carece de la materia orgánica y de los nutrientes que necesitan las plantas. Limitarse a añadir abonos sintéticos no siempre basta para aumentar el rendimiento, y en algunos casos puede incluso dañar el suelo aún más. La degradación del terreno continúa a ritmos alarmantes, lo que ha provocado que unas cosechas que ya eran pobres se estanquen o rindan aún menos.

JIM RICHARDSON

La situación es preocupante porque, de los 800 millones de personas desnutridas del mundo, unos 220 millones viven en la región subsahariana. Su población, de unos 1000 millones de personas, se habrá duplicado en 2050 y se verá muy afectada por el cambio climático. Si el suelo no mejora, el hambre aumentará.

En principio, la solución está clara: habría que reconstruir los suelos con materia vegetal y animal descompuesta. Estas sustancias orgánicas añaden nitrógeno y carbono, contribuyen a retener el agua y nutren los microorganismos que mantienen productiva la tierra. En la práctica, sin embargo, los problemas abundan. La mayoría de los agricultores no puede generar o comprar suficientes residuos de cosechas, compost o estiércol animal para reconstruir la tierra. Y la restauración ha de hacerse mientras se sigue cosechando, pues las familias no pueden permitirse dejar de plantar mientras se regeneran sus tierras.

La solución adoptada por Majoni pertenece a una serie de técnicas conocidas como perennación, las cuales podrían inducir un gran cambio en África. Se basan en renovar los suelos haciendo crecer árboles, arbustos o hierbas perennes entre las plantas cultivadas o junto a ellas, lo que aumenta el rendimiento de los cultivos y mejora la sostenibilidad a largo plazo de la producción de alimentos. Las plantas perennes proporcionan carbono y nitrógeno al suelo, ayudan a retener el agua, reducen la erosión, combaten las plagas y aumentan la absorción de abonos

por las plantas cultivadas. Las técnicas funcionan bien con los métodos modernos, como la agricultura sin labranza o la agricultura ecológica, así como con los cultivares actuales creados para aumentar la tolerancia a la sequía y la resistencia a las enfermedades y las plagas. Además, las plantas perennes pueden proporcionar a los campesinos pienso para el ganado y madera como combustible.

Ya existen tres métodos de perennación que ilustran hasta qué punto es posible aumentar de manera sostenible el rendimiento de algunos cultivos básicos, como el maíz y el sorgo, y enriquecer los suelos. Aunque se conocen otros, estos tres han tenido éxito en el África subsahariana y cuentan con un gran potencial para que su uso se extienda en la zona. Pueden lograr que la producción de grano pase de una tonelada por hectárea a tres en varios años. Y las lecciones que aprendamos podrían ayudar en otras áreas del mundo con suelos tropicales y subtropicales pobres en nutrientes, como ocurre en países de Asia meridional y de Sudamérica.

ÁRBOLES Y LEGUMINOSAS

La estrategia de perennación más empleada por los agricultores africanos —así fue en el caso de Majoni— se conoce como agricultura «siempre verde». Los agricultores plantan determinadas especies de árboles en los campos de cultivos anuales. Sus hojas, ricas en nitrógeno, caen y abonan la superficie del suelo, al tiempo que la actividad de sus raíces profundas añade nitrógeno y carbono. Suele usarse *Faidherbia albida*, una especie nativa del continente similar a las acacias. Crece sobre todo entre los meses de la cosecha y la siembra, de modo que no compite con los cultivos por el agua, los nutrientes ni la luz. En las regiones donde la cosecha se hace a mano, los agricultores pueden plantar los árboles al azar, aunque también cabe espaciarlos de manera regular y con suficiente separación entre sí para que tractores y cosechadoras pasen entre ellos. En las últimas décadas, más de 100.000 agricultores de Zambia han integrado este árbol leguminoso en sus maizales. En Níger y Mali, los campesinos han protegido los plantones de estos árboles que, de manera natural, crecen en más de 5 millones de hectáreas de campos de mijo y sorgo, con lo que han creado zonas verdes seminaturales. Otras especies de árboles también están funcionando bien.

Los árboles, algunos de los cuales alcanzan los 30 metros de altura, extraen asimismo otros nutrientes, como fósforo y potasio, ya que sus raíces penetran en capas del suelo mucho más profundas que aquellas hasta las que llegan las plantas cultivadas. Como ocurre con el nitrógeno, estos nutrientes se abren camino hasta los cultivos gracias a la descomposición de la hojarasca y a la actividad radicular. Además, los árboles protegen las plantas cultivadas de los vientos cálidos y secos, con lo que reducen la cantidad de agua que se evapora del suelo. Estos beneficios pueden duplicar el rendimiento de los cereales, y ayudan a triplicarlo si, además, se usan abonos y variedades modernas.

Más de 30.000 agricultores en África oriental han adoptado un segundo tipo de perennación, apodado «atraer y expulsar» (*push-pull*). Sitúan ciertas plantas perennes en el interior de los maizales y alrededor de sus lindes. Estas suprimen las plagas de insectos y las malas hierbas, pero pueden también mitigar la erosión, producir pienso para el ganado y reducir la necesidad de abonos. Por ejemplo, los agricultores emplean este método para combatir tanto las larvas de barrenillos, que perforan los tallos del maíz, como las hierbas de bruja, una planta parásita que sustrae nutrientes a las raíces del maíz. Entre las hileras de este cereal, los campesinos plantan desmodio (*Desmodium uncinatum*), una leguminosa perenne que generalmente se cultiva como pienso para el ganado. Esta planta produce un olor que repele, o «expulsa», a las polillas de los barrenillos que intentan poner sus huevos. Al mismo tiempo, una sustancia de sus raíces elimina las hierbas de bruja.

Para reducir todavía más el daño que causan las plagas, los agricultores pueden plantar alrededor del maizal hierba de elefante (*Pennisetum purpureum*, también llamada pasto de Napier) a fin de «atraer» a los barrenillos. La hierba proporciona un lugar llamativo para que los barrenillos repelidos por los desmodios pongan allí sus huevos, pero produce una resina pegajosa que atrapa las larvas cuando eclosiona la crisálida. Esta planta es, además, un valioso pienso para el ganado.

La técnica de atraer y expulsar puede multiplicar por más de dos la producción de maíz cuando los barrenillos y la hierba de bruja son un problema, y hacer que la producción aumente entre un 25 y un 30 por ciento cuando solo lo son los barrenillos.

John P. Reganold es profesor de edafología y agroecología de la Universidad estatal de Washington. Forma parte del comité asesor de *Scientific American*.

Jerry D. Glover es primer asesor de sistemas agrícolas sostenibles de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos (USAID). Las opiniones expresadas en este artículo no son necesariamente las de USAID.



EL AGRÓNOMO Albert Chamango muestra cacahuetes y guandúes, una leguminosa más alta que la primera. Ambas plantas pueden crecer juntas sin estorbarse y, al mismo tiempo, revitalizar el suelo.

EN SÍNTESIS

Los suelos de muchas regiones del África subsahariana están tan empobrecidos que limitarse a añadir abonos no los mejorará, e incluso podría empeorarlos.

Colocar plantas perennes (árboles, arbustos y leguminosas) entre los cultivos puede reconstruir los suelos y reducir las plagas mientras las plantas cultivadas crecen, lo que permite aumentar la producción.

Más de un millón de agricultores africanos han utilizado ya las tres principales técnicas de perennación. Sin embargo, muchos millones más necesitan ayuda técnica o económica para explotarlas.

JIM RICHARDSON

El pienso para el ganado y una mayor cantidad de nitrógeno en el suelo constituyen beneficios adicionales.

El tercer método ha sido desarrollado por científicos de Malawi y Estados Unidos. Se trata del sistema de «doble leguminosa», adoptado en más de 8000 explotaciones de Malawi. En su forma más simple, consiste en plantar una leguminosa de porte bajo y crecimiento rápido, como cacahuetes o soja, a la cual se añade guandú, o frijol de palo (*Cajanus cajan*), de porte más alto, pero que crece más despacio y tiene raíces más profundas. Los cacahuetes o la soja maduran en pocos meses, justo cuando el frijol de palo los sobrepasa en altura y taparía el sol. Tras recolectar los cacahuetes o la soja, sus hojas caen y enriquecen el suelo. Uno o dos meses después, el guandú madura y es cosechado, sus hojas caen y continúan el enriquecimiento. Puesto que cada cultivo crece a su ritmo y alcanza profundidades diferentes, uno y otro no suelen competir por los nutrientes ni el agua. El método aumenta la cantidad de plantas ricas en proteínas que un agricultor puede cosechar en un año y mejora el suelo. Además, necesita menos trabajo que el que requerirían los dos cultivos por separado y amplía la variedad de alimentos a los que puede acceder la familia que trabaja los campos.

Los frijoles de palo vuelven a crecer después de la recolección. Así, en la segunda temporada, los agricultores pueden plantar maíz entre estos guandúes y, más tarde, cosechar el maíz y una segunda cosecha de frijoles. En dos temporadas, este sistema produce tres cosechas de leguminosas y una de maíz, y proporciona un 50 por ciento más de proteína que las rotaciones tradicionales de maíz y leguminosa.

OPTIMIZAR LAS COSECHAS SEGÚN EL ENTORNO

Para los más de un millón de agricultores africanos que han integrado plantas perennes en su rutina, la recompensa ha sido fabulosa. Han regenerado los suelos a la vez que aumentaban de forma sostenible la producción de alimentos y mejoraban extraordinariamente su forma de ganarse la vida. Sin embargo, muchos millones de agricultores subsaharianos más ni siquiera saben que estas técnicas existen o, si las conocen, necesitan ayuda técnica o financiera para explotarlas. Además, las buenas prácticas no se aplican tan rápido como los abonos o los plaguicidas. Los agricultores deben aprender qué hay que hacer para que las plantas perennes y las anuales crezcan juntas, han de gestionar rotaciones de cultivos más largas e idear estrategias de mercado para una cosecha diversificada. Asimismo, muchos campesinos no son dueños de la tierra que trabajan o sus arriendos no son firmes, lo que puede disuadirlos de invertir en soluciones a largo plazo.

La comunidad internacional debería aumentar la inversión en el desarrollo de la perennación, fomentar las técnicas provechosas y respaldar la investigación de aquellas que agricultores y científicos aún no han ensayado lo suficiente. Ya están en marcha algunas iniciativas así. El Centro Mundial de Ingeniería Agroforestal, un instituto de investigación internacional que ha liderado el desarrollo de la agricultura de hoja perenne, se halla en el último año de un proyecto de cuatro años denominado Árboles para la Seguridad Alimentaria, en asociación con los gobiernos de Etiopía, Ruanda, Burundi y Uganda. El Programa para la Intensificación Sostenible, de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE.UU., respalda en el África subsahariana las tres técnicas que hemos descrito.

Científicos del Instituto de Investigación de Cultivos para los Trópicos Semiáridos, la Universidad de Malawi y la Universidad estatal de Michigan están ayudando a agricultores de África oriental a mejorar todavía más los sistemas de doble leguminosa gracias al desarrollo de más tipos de guandúes, adecuados para diferentes condiciones climáticas y distintas necesidades de los agricultores. Otros expertos han conseguido crear versiones perennes de plantas anuales tradicionales, como el sorgo, el trigo y el arroz, y ahora intentan aumentar el rendimiento y mejorar otros aspectos estas nuevas plantas. La Universidad estatal de Washington, la de Michigan y el Instituto de la Tierra en Salina, en Kansas, cultivan cereales perennes que puedan medrar en tierras de cultivo de diversa naturaleza.

Tales esfuerzos son un buen principio, pero los investigadores todavía no están seguros de qué técnicas de perennación funcionarán mejor en los diversos entornos del África subsahariana y más allá, por lo que es necesario un análisis más profundo. Para ello, científicos de la Universidad Rutgers y del departamento de agricultura y bioenergía de una compañía china han propuesto una red mundial de entre 27 y 45 estaciones de investigación, algunas de ellas en África, las cuales estudiarían la adecuación de una serie de árboles, arbustos y otras plantas perennes a las condiciones climáticas, ambientales y culturales de cada lugar. Los científicos estiman que una aportación de entre 540 y 1800 millones de dólares dotaría a la red de programas sostenibles. Se ha estimado que, solo en los campos cultivados del África subsahariana, las pérdidas de nitrógeno, fósforo y potasio suponen 4000 millones de dólares anuales. Si consideramos que la perennación puede reducir dichas pérdidas, llegar a nuevas fuentes de nutrientes en suelos profundos y, cuando se usan leguminosas, reducir el uso de abonos de nitrógeno, veremos que la inversión merece la pena.

Los campesinos africanos se enfrentan a todo tipo de dificultades. Aun así, muchos de ellos se han beneficiado de la perennación en entornos hostiles. Fomentar esta técnica hará que muchos más puedan alimentar a sus familias y vecinos, generen ganancias para ellos y sus trabajadores y mejoren el nivel de vida de sus comunidades. IyC

PARA SABER MÁS

Tripling crop yields in tropical Africa. Pedro A. Sánchez en *Nature Geoscience*, vol. 3, n.º 5, págs. 299-300, mayo de 2010.

Evergreen agriculture: A robust approach to sustainable food security in Africa. Dennis Philip Garrity et al. en *Food Security*, vol. 2, n.º 3, págs. 197-214, septiembre de 2010.

Plant perennials to save Africa's soils. Jerry D. Glover, John P. Reganold y Cindy M. Cox en *Nature*, vol. 489, págs. 359-361, 20 de septiembre de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agricultura sin labranza. David R. Huggins y John P. Reganold en *IyC*, septiembre de 2008.



EL PEQUEÑO BOKITO en brazos de su madre, la gorila Aya, en el zoológico holandés de Róterdam.

COGNICIÓN

¿SABEN LOS ANIMALES DE DÓNDE VIENEN?

A pesar de las apariencias, ni siquiera nuestros parientes simios más cercanos parecen disponer de las facultades cognitivas necesarias para vincular sexo y reproducción

Holly Dunsworth

Tal vez haya oído hablar de Koko: una gorila corpulenta pero afable, que domina el lenguaje de los signos gestuales. Tiene 44 años y vive en California. Le gustan los gatitos. Hasta sabe de dónde vienen los bebés y participa en la planificación de su propia maternidad, o, al menos, eso es lo que un difundido vídeo de YouTube invita a creer.

En él, su cuidadora, Francine Patterson, le muestra a la gorila, demasiado mayor para concebir, un cuaderno que esboza cuatro soluciones que le permitirían ser madre. Patterson le cuenta que un grupo de gorilas (un macho y dos hembras adultos con una cría) podrían venir a vivir con ella y su compañero, Ndume. Otra opción sería que un recién nacido y una o dos crías más mayores se le unieran; en un tercer caso, solo recibiría un bebé. La cuarta opción, le explica, es traer a dos hembras para que conciban bebés con Ndume para Koko. La cuidadora entrega la lista a la gorila, que deja de rascarse el pecho y parece rumiar su decisión. Con el índice derecho acaba por señalar la última opción del cuaderno. «Es una gran idea: eso hará feliz a Koko y también a Ndume», le dice la cuidadora.

EN SÍNTESIS

Los animales se comportan a menudo como si supieran el modo en que vienen los hijos al mundo.

Si bien ese aspecto nunca ha sido estudiado directamente, las observaciones sobre cómo razonan, se comunican y planifican denotan la carencia de las aptitudes cognitivas necesarias para entender que el sexo engendra la descendencia.

Si nuestros parientes los grandes simios supieran quién es la cigüeña probablemente se comportarían de un modo más similar a nosotros.

VALERIE KUYPERS, GETTY IMAGES

Holly Dunsworth, antropóloga de la Universidad de Rhode Island, estudia la evolución humana y de los simios. Escribe en el blog de ciencia *The mermaid's tale* y es una de los autores de *The baby makers*, que analiza el impacto evolutivo de las creencias vinculadas con la procreación.



Así que ahí lo tenemos: Koko ha de saber cómo nacen los bebés. ¿Por qué, si no, habría elegido a los adultos que los engendran y no al propio bebé?

Mucha gente da por supuesto que los animales saben todo lo que es preciso sobre la concepción. En la especie de Koko, los machos maduros guardan celosamente sus harenes de hembras frente a otros rivales. Y los retadores victoriosos suelen matar la prole del vencido antes de afanarse en concebir la suya. Además, evitan el incesto y la endogamia haciendo que los individuos abandonen la familia para fundar la suya cuando alcanzan la madurez sexual.

El gorila no ostenta en absoluto el monopolio de las conductas de estrategia sexual y parental. Las gallinas expulsan el esperma que no desean antes de que logre fecundar sus huevos. Los papiones intervienen en las riñas de sus hijos cuando se hallan en apuros e interceden ante los demás. Algunas hembras gimen cuando copulan con los machos dominantes, pero no con los subalternos, en un ardid para dar a conocer su atractivo a otros consortes influyentes. Dondequiera que uno mire, verá animales que se comportan como si supieran perfectamente cuál es el fruto del sexo, qué relación guarda con las parejas potenciales y con la prole, y lo primordial que es para perpetuar su linaje. Nos encanta narrar los encuentros amorosos y la paternidad de los animales con un lenguaje que implica un común denominador con nosotros. Pero ¿saben de veras que la cópula es el origen de la concepción? ¿Lo sabe Koko?

MENTE ANIMAL

No existe bibliografía acerca de si los animales entienden la reproducción, así de tajante. Lo mejor con que contamos para conocer lo que saben sobre «la realidad de las cosas» procede de los trabajos del primatólogo Daniel Povinelli, de la Universidad de Luisiana en Lafayette (los primates son los más afines desde el punto de vista intelectual), quien sondeó sobre su aptitud en campos como la física y otros que implican una relación de causa y efecto. En sus libros *Folk physics for apes* («Física elemental para monos») y *World without weight* («Un mundo sin peso»), Povinelli describe décadas de trabajo experimental destinado a indagar lo que los simios saben sobre la gravedad.

A algunos chimpancés se les puede adiestrar para que ordenen ciertos objetos según el esfuerzo que supone levantarlos. Pero si se les entrena para que aprendan a ordenar los objetos de más a menos pesados sin alzarlos, solo aciertan por azar, prueba de que su comprensión no tiene nada que ver con el peso. Tal y como Povinelli señala, su vara de medir radica en la apreciación física, no en la inteligencia mental.

Entender los fenómenos inobservables, como la gravedad o la fecundación, exige poseer razonamiento abstracto, la capacidad de crear esquemas mentales de causas o fuerzas intangibles. El hombre emplea el pensamiento abstracto para extrapolar el conocimiento de una situación a otra, lo que nos permite resolver problemas inéditos e incluso idear nuevas diversiones para nuestro disfrute. A pesar de que ciertos animales como los chimpancés son mucho más inteligentes de lo que solíamos reconocer, no parecen dotados de esa capacidad cognitiva. Recuerdo la pregunta de un sagaz alumno de 13 años: «¿Por qué los chimpancés no juegan al fútbol?» No por imposibilidad anatómica, sino «porque no podemos explicarles las normas».

Por supuesto, que no hayamos descubierto el razonamiento abstracto en los simios no significa que carezcan de él. Demos por cierto el argumento de que poseen ese don. En tal caso, aun así cada individuo simiesco tendría que descubrir por sí mismo que el sexo conduce a la maternidad, o tendría que compartir ese saber acerca de la reproducción a través de alguna suerte de lenguaje. Y eso nos conduce al siguiente problema: ninguna otra especie posee el don de la palabra.

Después de años de entrenamiento, Koko es capaz de nombrar cientos de objetos cuando se le pide, pero no de entablar una charla sobre ellos. Si no fuera por su habilidad para señalar, nadie diría que su talento natural para la comunicación verbal es avanzado. Los gorilas rugen cuando ven un festín ante sus ojos, gruñen cuando se acercan a otro congénere o se separan de sus crías, gimen durante la cópula y ríen cuando juegan. Los primatólogos Alexander H. Harcourt y Kelly Stewart, ambos entonces en la Universidad de California en Davis, estudiaron esas vocalizaciones en el gorila de montaña (muy similar al de costa, como Koko) y comprobaron que no son más complejas que las exhibiciones de amenaza en señal de enojo. Anuncian el estatus social y la actitud más o menos inmediata del vocalizador, eso es todo.

Las escasas aptitudes verbales son la norma en los primates. El mono verde tal vez posea lo más parecido al lenguaje humano, pero dista mucho de alcanzar su complejidad. Tal y como Dorothy Cheney y Robert Seyfarth, de la Universidad de Pensilvania han constatado en largas jornadas de observación en África oriental, los monos verdes emiten distintos gritos de alarma para advertir de la presencia de un águila, una serpiente o un leopardo. Esos chillidos o «palabras» no los aprenden como las palabras humanas, son innatos. Pese a ser arbitrarios, como nuestras palabras, nunca los usan para aludir a una serpiente que vieron ayer o para alertar a otros sobre un leopardo que puedan encontrar mañana. Aunque logremos convencer de que esos reclamos son palabras simiescas, resulta difícil pasar de ese «lenguaje» rudimentario a uno en que el hablante pueda explicar, por ejemplo, que los bebés vienen al mundo porque los adultos copulan.

Además, no existen indicios de que los animales posean el concepto del tiempo que es preciso para vincular una causa como es la cópula con un efecto tan distanciado en el tiempo como es el nacimiento de una cría y planear en consecuencia. Se ha visto a orangutanes, bonobos y chimpancés guardar útiles para un futuro uso. El más astuto es Santino, un chimpancé de un zoo sueco que apila piedras bajo haces de hierba para lanzarlas a los visitantes.

Pero la capacidad de planificación observada en los simios abarca unas horas, a lo sumo días; no digamos ya el período de gestación, casi tan dilatado como el de la mujer.

Si los animales no poseen razonamiento abstracto, ni lenguaje ni la capacidad de planificación a medio o largo plazo necesaria para procrear a sabiendas, sí deben saber qué han de hacer (copular) aunque no sepan el porqué (que la cópula lleva a la concepción y, por ende, a la perpetuación de la especie). Sin duda los animales hacen gala de todo tipo de comportamientos aparentemente complejos sin prever realmente los resultados. La especialista en cognición Sara Shettleworth, de la Universidad de Toronto, plantea el ejemplo de los cuervos que dejan caer nueces sobre superficies duras para cascar las que queden entreabiertas. Muchos suponen que el cuervo practica de modo consciente ese comportamiento para conseguir comida. Pero Shettleworth matiza que un enfoque más científico para entender ese proceder consiste en asumir que la causa es «inmediata»: el estado fisiológico del córvido (el hambre) está vinculado con la presencia de las nueces y de las superficies duras. O sea, que lo que lo impulsa a volar sobre el suelo duro y lanzar la nuez es la fisiología que fomenta la conducta condicionada de recolección de alimento basada en el éxito pretérito, no su lógica de cuervo acerca del mejor modo para saciar el hambre.

El estudio de las causas inmediatas del comportamiento animal es un concepto difícil de asimilar. Suponemos que puesto que sabemos por qué hacemos las cosas, los animales que hacen cosas parecidas también deben saberlo y humanizamos su conducta. Pero ese razonamiento carece del debido rigor para entender de veras la cognición animal.

Resulta más lógico explicar el comportamiento de la gorila y la mayoría de las cosas que hacen los animales sin atribuirles ninguna de nuestras facultades de imaginación, sobre todo en lo referente a la procreación y la paternidad. Pensemos en el macho que mata la cría que su nueva pareja había concebido con otro. Los infanticidas sacan más provecho de sus genes en las futuras generaciones que los que no lo son, por lo que si existe una base biológica para esta conducta compleja o para su aprendizaje, o ambas cosas, esta se transmitirá a los hijos, que podrán actuar igual, o a las hijas, que podrán engendrar hijos que la practiquen. Estos machos mostrarán menos agresividad hacia sus parientes y más contra los extraños, selectividad que tal vez se vea reforzada por la familiaridad que da el tiempo. En el momento en que los nuevos machos dominantes sean padres, habrán perdido el impulso de matarlos, tal vez gracias a las hormonas que condicionan el comportamiento y que abren canales de comunicación entre su cuerpo, las crías y sus madres. Ningún aspecto de este fenómeno exige de su parte ningún conocimiento de la reproducción o la paternidad.

SI LO SUPIERAN

Si pudiéramos enseñar de algún modo a los simios antropomorfos que el sexo engendra los bebés, cabría esperar que su comportamiento en libertad cambiara de manera drástica. Los machos y las hembras que quisieran ser padres comenzarían a recoger semen y a introducirlo manualmente. Tal vez el macho permanecería junto a la hembra hasta mucho después del coito, quizás hasta el nacimiento o hasta que la cría hubiese crecido lo suficiente para emanciparse. Las hembras serían más competitivas para conquistar a los machos predilectos. Y si se las forzara, quizás intentarían abortar. Por último, las que no quisieran quedar preñadas podrían esfumarse durante el estro, cuando son fértiles y atraen la atención de los machos.

Saber de dónde vienen los niños llevaría a entender el parentesco que une a los individuos, lo que tendría sus consecuencias en el comportamiento. Machos y hembras comenzarían a interesarse por la conducta reproductora de su descendencia y, tal vez, la ayudarían a ascender en el escalafón social, ya desde la inmadurez, con el fin de hallar un buen partido. Hasta podrían impedir que los jóvenes abandonasen el grupo en la madurez sexual para influir en su actividad procreadora. Los hermanos, conscientes de ser hijos de los mismos padres, trabarían vínculos más fuertes y longevos de lo que es habitual en su especie. Sabedores de su relación con la descendencia que se aparea con individuos de otros grupos y que engendra sus propios hijos, los simios seguramente competirían menos y mostrarían menos agresividad hacia otros grupos que antaño habrían tomado por rivales y ahora considerarían afines.

En suma, si los simios supieran que el sexo es la base de la concepción, actuarían de un modo mucho más parecido a las personas. Lo que nos trae de vuelta a Koko. No solo he visto esa filmación de la gorila: he visionado muchas otras y me he percatado de que practica sus signos y aprende otros nuevos cuando se le muestran los símbolos en un cuaderno. Da la impresión de que cada vez que se le enseña un símbolo, primero lo señala con el dedo, pueda o no recordar y mostrar el signo correcto. Así pues, su elección en cuanto a la maternidad no demuestra en absoluto que entienda la cuestión, y mucho menos la procreación.

Por apasionadas o cariñosas que parezcan sus prácticas, ningún aspecto del comportamiento sexual, social y parental de los animales exige el conocimiento consciente de la reproducción. En cambio, buena parte del comportamiento de *Homo sapiens* no se explicaría sin él. En algún punto del camino que nos separa, concebimos una cultura rica en creencias relativas a la procreación, la familia y los lazos de sangre, que nos distingue en muchos aspectos de nuestros parientes y de la demás fauna del planeta. IyC

PARA SABER MÁS

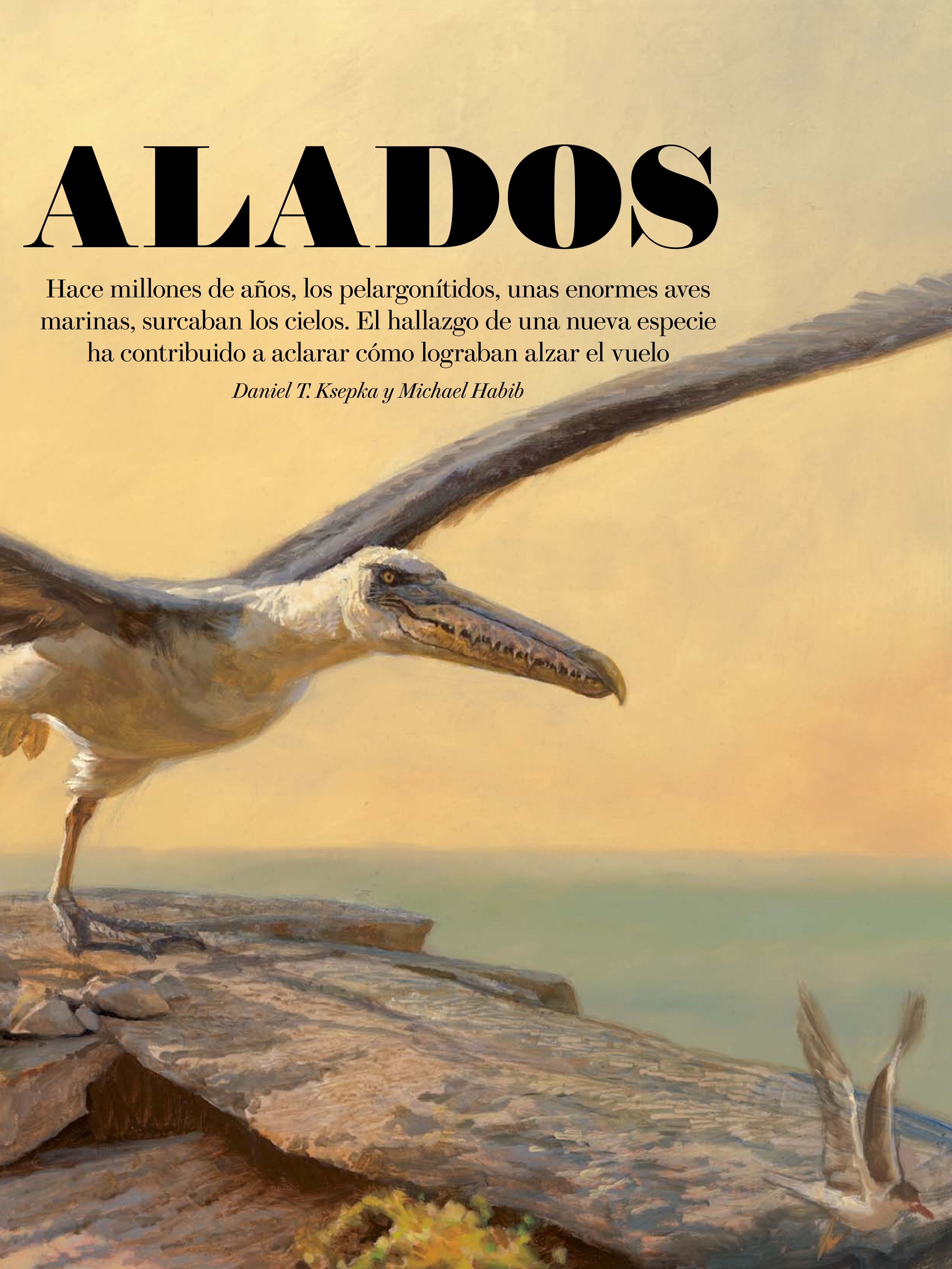
Folk physics for apes. Daniel J. Povinelli. Oxford University Press, 2000.
World without weight. Daniel J. Povinelli. Oxford University Press, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

La conciencia animal. Pierre Buser, en «La conducta de los primates», colección *Temas* de *IyC* n.º 32, 2003.
La razón de los simios. Thierry Bernard, en *MyC*, julio/agosto de 2008.

GIGANTES DEL PASADO





ALADOS

Hace millones de años, los pelargonítidos, unas enormes aves marinas, surcaban los cielos. El hallazgo de una nueva especie ha contribuido a aclarar cómo lograban alzar el vuelo

Daniel T. Ksepka y Michael Habib

Daniel T. Ksepka es paleontólogo y conservador científico en el Museo Bruce de Greenwich, Connecticut. Su investigación se centra en la evolución de las aves y los reptiles.

Michael Habib es anatomista en la Universidad del Sur de California. Estudia la biomecánica de los animales extintos, entre ellos aves y pterosaurios.



En puertos pintorescos como el de Charleston, en Carolina del Sur, hoy podemos contemplar una amplia diversidad de aves marinas, como pelícanos y cormoranes en busca de alimento en el estuario, gaviotas y garzas atareadas en los nidos de las islas cercanas o pájaros migratorios en ruta hacia latitudes más cálidas donde pasar el invierno. En cambio, hace 25 millones de años los dragones dominaban los cielos de Carolina. Por supuesto, no eran los monstruos de la mitología medieval, sino lo más parecido que ha engendrado la evolución, temibles por derecho propio: aves gigantescas, de mayor envergadura que algunos aviones ligeros, armadas con picos aguzados como lanzas.

Ironía del destino, los primeros indicios sobre estas terroríficas criaturas provienen de fósiles hallados en el aeropuerto internacional de Charleston. En 1983, un equipo dirigido por el paleontólogo Al Sanders, entonces en el museo de la ciudad, desenterró los restos y los reconoció como pertenecientes a un ave de gran tamaño. Pero los fósiles recuperados eran muchos y los huesos acabaron en un almacén. Hubieron de transcurrir tres décadas antes de que uno de nosotros (Ksepka) los estudiara y descubriera la trascendencia de estos restos olvidados. Sanders y sus colaboradores habían hallado los vestigios de la mayor ave voladora de todos los tiempos, una especie desconocida perteneciente al enigmático grupo de los pelagornítidos. Ksepka la bautizó *Pelagornis sandersi*, en honor a su descubridor.

Hace más de siglo y medio que los paleontólogos saben que el grupo de los pelagornítidos surcó los cielos en el pasado remoto. Pero solo contaban con un puñado de especímenes fragmentarios y poco se sabía sobre cómo volaban, sus costumbres o el origen de su enorme talla. Análisis recientes del mayor de todos, *P. sandersi*, sumados a los estudios de otras aves colosales realizados por uno de nosotros (Habib), han venido a llenar esa laguna y nos han permitido esbozar una imagen más completa de estas rarezas zoológicas. Los últimos datos indican que adquirieron su protagonismo después del impacto del asteroide que acabó con los dinosaurios y con sus parientes voladores, los pterosaurios. Los pelagornítidos bien pudieron adquirir semejante tamaño como adaptación a la búsqueda de alimento en el mar abierto. Sea cual fuere la causa de su gigantismo, alcanzaron envergaduras que superan el límite de lo que algunos creían posible en un ave voladora.

HUESOS ENIGMÁTICOS

El estudio de los pelagornítidos se remonta mucho tiempo atrás y resulta sumamente interesante. En 1857, el paleontólogo francés Edouard Lartet describió un hueso enorme del ala de una de estas aves, que él atribuyó a un albatros extinto. La denominó *Pelagornis miocaenus*, que significa «ave marina del Mioceno». A pesar de este anodino nombre, el fósil resultaba intrigante. El húmero del ala medía cerca de 60 centímetros, lo que significa que la envergadura de su propietario duplicaba a la de los albatros actuales, algo inconcebible en los días de Lartet. Por desgracia, con solo ese pedazo del ala era imposible deducir o siquiera imaginar el aspecto del ave.

Una quincena de años más tarde, en 1873, el anatomista inglés sir Richard Owen describió el cráneo de otro pájaro gigante al que bautizó como una especie nueva: *Odontopteryx toliapica*. Su estudio demostró que tan peculiar cráneo no podía pertenecer a ninguna de las familias de aves modernas, bien al contrario, debía ser miembro de un grupo desconocido de grandes aves extintas. El descubrimiento de otros especímenes más enteros reveló que el húmero de Lartet pertenecía a dicho grupo.

PÁGINAS ANTERIORES: JAMES GURNEY

EN SÍNTESIS

Los paleontólogos saben desde hace tiempo que unas aves singulares denominadas pelagornítidos dominaron una vez el cielo.

Algunos alcanzaron dimensiones mucho mayores que las de las aves voladoras de hoy en día.

El reciente descubrimiento de otra nueva especie del grupo, la mayor ave voladora conocida, ha ayudado a averiguar cómo volaban y por qué adquirieron tamañas dimensiones.



CORTESÍA DEL MUSEO DE CHARLESTON

EN EL CRÁNEO casi completo del ave extinta *Pelagornis sandersi*, visto aquí desde varios ángulos, se observa la característica dentición falsa de los pelagornítidos. Los dientes son proyecciones afiladas surgidas del hueso mandibular, que habrían ayudado a este depredador a capturar a sus presas.

A lo largo del siglo xx se sucedieron con cuentagotas nuevos hallazgos, algunos de los cuales cayeron en el olvido. En 1910 se dio a conocer uno de los cráneos más completos de pelagornítido jamás encontrados, atribuido a otra especie nueva, *Pseudodontornis longirostris*. La Universidad de Königsberg se lo había comprado a un marinero brasileño. Años más tarde, esta ciudad alemana sufrió los estragos de la Segunda Guerra Mundial, quedó devastada y acabó anexionada a la Unión Soviética con el nombre de Kaliningrado. En ese trance se perdió todo rastro de la pieza: tal vez no sobreviviera al conflicto, o quizá fue robada o acabó siendo trasladada a otro lugar.

En las décadas siguientes, los buscadores de fósiles descubrieron más pelagornítidos, entre ellos *Pelagornis orri,* en California, y *P. chilensis,* en Chile. Y aunque la mayoría de esos primeros hallazgos eran a lo sumo esqueletos incompletos, se pudo comenzar a reunir las piezas del rompecabezas, recomponer su anatomía y deducir sus costumbres.

El retrato bosquejado desafiaba la imaginación. Uno de los rasgos más sobresalientes de los pelagornítidos eran sus mandíbulas armadas de hileras de «dientes» falsos. Las aves perdieron la capacidad de formarlos hace más de 65 millones de años. Pero el mentado grupo ideó una solución alternativa. A diferencia de los dientes verdaderos, compuestos de esmalte y de un tejido calcificado conocido como dentina, que permanecen sujetos al hueso encajados en los alvéolos, los pseudodientes de los pelagornítidos eran proyecciones huecas y afiladas surgidas directamente del tejido óseo. Dispuestos en grupos repetidos en las especies mejor conocidas, el tamaño alternaba de una manera fija: dos pseudodientes pequeños y cortos flanqueaban a un tercero y, a su vez, estas tríadas quedaban separadas por otro pseudodiente más cónico y alto. Con toda probabilidad, en vida estos dientes óseos estaban cubiertos de una capa delgada de la misma sustancia córnea que enfunda el pico de las aves actuales. El rictus debía ser siniestro, con sus hileras de púas afiladas donde las presas quedarían atenazadas sin remedio.

El vuelo de un ave colosal

Análisis recientes del esqueleto fósil de *P. sandersi*, descubierto hace décadas en el recinto del aeropuerto de Charleston (EE.UU.), demuestran que es la mayor ave voladora que ha existido, con un tamaño que duplica el del ave actual más grande, el albatros errante. De hecho, *P. sandersi* supera las dimensiones que algunos expertos creían posible en un ave voladora. Presenta varias adaptaciones importantes para el vuelo (*derecha*). La comparación de sus proporciones con las de las aves actuales ha ayudado a reconstruir su vuelo (*abajo*).

Hombro
La escápula es increíblemente pequeña si se la compara con el resto del cuerpo. Ello indica que la musculatura que unía el ala al cuerpo era muy reducida, seguramente porque batía poco las alas para volar. Además, la inusual forma cuadrangular de la cabeza del húmero impediría la rotación de la articulación del hombro, cosa que dificultaba el aleteo, pero ayudaba a estabilizar el ala durante el planeo.

Largas y delgadas
Los factores que determinan el tipo de vuelo incluyen el llamado índice de aspecto (la relación entre la longitud y la anchura del ala), la carga alar (el peso que cada centímetro cuadrado de ala tiene que soportar) y el contorno de las alas. *P. sandersi* tenía unas alas muy parecidas a las del albatros: alargadas, puntiagudas y con una carga alar intermedia. Todo ello indica que este gigante debió ser un soberbio navegante sobre los océanos.

P. sandersi

Argentavis
Esta especie fósil ostentaba hasta hace poco el título de mayor ave voladora. Sus alas eran similares a las del cóndor, con un bajo índice de aspecto y puntas ranuradas.

ILUSTRACIONES DE RAÚL MARTÍN (*P. sandersi*) Y DAISY CHUNG (*siluetas*)



Ala
Los huesos alares eran finos como el papel pero muy resistentes. Esta combinación habría reducido el peso del ave sin menoscabar su robustez ante las fuertes ráfagas de viento.
Extremidad posterior
Torpe en tierra por ser paticorto, P. sandersi podría, sin embargo, correr distancias cortas para alzar el vuelo. Sus pies, presumiblemente palmeados, le permitirían despegar con mayor soltura desde el agua.
Rabihorcado magnífico
El gran índice de aspecto y la carga alar baja indican que su vuelo idóneo es más lento y a más altura que el del albatros. Los rabihorcados vuelan hasta a 2500 metros por encima del nivel del mar, mientras que los albatros lo hacen sobre las olas.
Avutarda
Es una de las aves voladoras más pesadas que existen. Su peso y unas alas largas y anchas le confieren una proporción y una carga alar intermedia. Batido lento y regular.
Gorrión común
Alas cortas y anchas, de extremos redondeados y carga alar intermedia permiten a este pájaro maniobrar en espacios reducidos.
Cóndor californiano
De alas relativamente anchas, su carga alar es intermedia y la punta de las alas es ancha y ranurada. Aprovecha las corrientes de aire caliente que ascienden desde el suelo para remontar el vuelo.
Ánade real
Sus alas largas, estrechas y puntiagudas, de alta carga alar le confieren velocidad pero no maniobrabilidad. En consecuencia, sobresale en el vuelo migratorio, pero no puede escapar de un halcón ni toma tierra con facilidad.
Colibrí gorgirrubí
Es una de las aves más chicas, lo que, añadido a su ala corta y ancha, una alta carga alar y un contorno similar a un cuchillo, le permite permanecer suspendido en el aire.
Grévol engolado
Las alas cortas, anchas y redondeadas generan un bajo índice de aspecto y una elevada carga alar. Ello le permite despegar rápidamente para huir, pero recorre con dificultad las distancias largas.
Albatros errante
Con su alto índice de aspecto, carga alar intermedia y forma puntiaguda, es un buen ejemplo de planeador marino. Es el ave viviente más parecida a Pelagornis.
Vencejo común
Alas de contorno similar a las del albatros, pero talla mucho menor. Las bate sin cesar para alzar el vuelo e impulsarse, principalmente sobre tierra firme.

Otras peculiaridades contribuirían a hacer de los pelagornitídos unos depredadores formidables: el cráneo era particularmente flexible. En su plano medio tenía una robusta bisagra que permitía cierto grado de flexión entre la caja craneana y la base del pico. Por si eso no bastara, la mandíbula inferior estaba dotada de una articulación en el punto medio que separa el lado izquierdo del derecho. En lugar de hueso macizo, la mandíbula quedaba unida a la «barbilla» por un ligamento flexible. Todos estos rasgos habrían conferido gran flexibilidad al pico, quizás con el fin de engullir presas voluminosas.

El esqueleto de los pelagornítidos también difiere del de las otras aves. Los huesos alares son tan aplanados que en las reconstrucciones algunos paleontólogos colocaron erróneamente el húmero en posición invertida. Todas las aves voladoras poseen huesos huecos que otorgan ligereza sin mermar notablemente su solidez, pero los pelagornítidos llevaron tal característica hasta el extremo. El esqueleto alar presenta unas paredes excepcionalmente finas. Esa delgadez aseguraba la debida rigidez a la par que reducía el peso y hacia posible que pudieran alzar el vuelo. Con todo, los huesos livianos tienen una desventaja: una colisión inesperada podía ser funesta, pues eran más vulnerables a la fractura. Y semejante percance condenaría al ave a permanecer varada en tierra, incapaz de procurarse el alimento.

Los huesos de las patas son quizá los más ordinarios de los pelagornítidos, al menos en cuanto a su forma, aunque son ridículamente pequeños en comparación con los alares. Eso sí, sus paredes eran más recias, por lo que debían ser fuertes. A semejanza de muchas aves marinas actuales, probablemente caminaban con torpeza en tierra firme y no se sentirían cómodos recorriendo grandes distancias a pie. Tal vez solo necesitaban emprender una corta y veloz carrera con la que ganar impulso para el despegue.

UN PLUSMARQUISTA NATO

Cuando en 2014 *P. sandersi* fue descrito al fin, ya sabíamos que los pelagornítidos eran en extremo singulares. Pero él es, si cabe, el más extraño de todos. Cercano al metro de longitud, más de un tercio que el de Lartet, el húmero de *P. sandersi* es más largo que el brazo de una persona mediana. Parecía inconcebible que restos fósiles de semejante tamaño pudieran pertenecer a un ave. Ciertas investigaciones habían fijado el límite teórico para un ave marina planeadora en 5,1 metros de envergadura; más allá de esa cifra, sería demasiado pesada para permanecer en el aire batiendo las alas. Pero los huesos de las extremidades descubiertos en el aeropuerto de Charleston pertenecían a un ala y a una pata de un ave voladora. Prueba de ello eran sus paredes óseas, tan delgadas que precisaron de un cuidadoso tratamiento endurecedor con productos químicos para evitar que se desmenuzaran. Y no había confusión posible, puesto que los huesos de las extremidades se hallaron junto a un cráneo dotado del rasgo distintivo de los pelagornítidos: los pseudodientes óseos.

El excelente estado de conservación de esas partes del esqueleto y la nueva información aportada por otros fósiles de pelagornítido han permitido reconstruir con detalle a *P. sandersi*. Su envergadura alar debió de ser de entre 6 y 7,40 metros, de punta a punta. Es la mayor conocida, del presente y del pasado; duplica con creces la del albatros errante, la mayor ave voladora actual. Si extrapolamos el peso a partir del contorno de los huesos que lo sostenían en pie, *P. sandersi* tuvo que pesar entre 22 y 40 kilogramos; el peso de un perro de la raza golden retriever. Comparado con un ave actual parece enorme, pero su gran envergadura le confería un aspecto esbelto, gracias a su cuerpo menudo y su osamenta ultraligera.

Con esos parámetros hemos estudiado qué tipo de vuelo tendría este y otros pelagornítidos gigantes. El cálculo de las capacidades del aparato locomotor en los animales extintos no resulta sencillo, pero hoy disponemos de mejores herramientas que nunca. Junto con la información fundamental que brindan las aves vivientes, la aplicación de los principios físicos de la aerodinámica nos permite elaborar una hipótesis sobre su forma de vuelo.

Las aves modernas hacen gala de una amplia variedad de tipos de vuelo, que abarcan desde el frenético aleteo del colibrí hasta el lento batir de la gaviota. Las alas extraordinariamente largas de *P. sandersi* y de otros congéneres suyos revelan que eran aves eminentemente planeadoras. En el planeo no se baten las alas para ascender, sino que se aprovecha la fuerza del viento para ganar altura y surcar el cielo. Las planeadoras vivientes recurren a diversas estrategias para permanecer en el aire durante largos períodos, por lo que averiguar la que adoptaban los pelagornítidos exige un análisis más profundo.

Los cóndores y los buitres poseen alas anchas en relación con su peso, lo que genera una carga alar baja. Es decir, cada centímetro cuadrado de la superficie del ala debe sostener una cantidad de peso menor que la que tendría que soportar el ala de otra ave de similar corpulencia con alas más pequeñas. También lucen extremos ranurados, o sea, el ave puede extender a voluntad las plumas primarias de la punta del ala para reducir la resistencia del aire. La combinación de baja carga alar y puntas alares en ranura permite aprovechar las corrientes de aire cálido que ascienden desde la superficie del terreno. También permite que lo hagan con alas relativamente más cortas que las de las aves marinas, lo cual resulta muy conveniente si se vuela en lugares con obstáculos tales como acantilados y vegetación.

El rabihorcado aprovecha de otro modo las corrientes térmicas que se crean sobre el mar, en lugar de tierra firme. Sus alas son más alargadas, estrechas y puntiagudas, carentes de ranuras. Además, es una de las aves más livianas y, por tanto, presenta una carga alar sumamente baja. Tales atributos la ayudan a recorrer grandes distancias, encumbrada a gran altura, aunque presta a caer en picado hasta la misma superficie de las olas para capturar a sus presas.

En el otro extremo del panorama de las aves marinas se halla el albatros, con alas puntiagudas de envergadura extraordinaria. Sin embargo, por ser más pesado en relación con la superficie de sus alas, precisa de vientos fuertes para arrancar a volar. El albatros aprovecha el gradiente de viento que se genera sobre las olas: vuela contra el viento suave, cerca de la superficie del agua, para ganar altura y, a continuación, traza un giro descendente hasta rozar las olas, aprovechando las fuertes rachas que soplan sobre ellas. La ejecución reiterada de esta maniobra en zigzag se denomina planeo dinámico y con ella recorren velozmente largas distancias. En 2004, un albatros al que se le había instalado un dispositivo de localización voló a una media de 127 kilómetros por hora durante nueve horas consecutivas, el récord de velocidad de planeo registrado en el reino animal. El ejemplar cabalgaba sobre los vientos de una tormenta antártica.

La información de que disponemos sobre los pelagornítidos a través de los especímenes excepcionales como el de *P. sandersi* indica que recurrían a un tipo de planeo inédito en las aves actuales. Si bien sus alas eran angostas, la superficie de sustentación alar era grande en virtud de su enorme envergadura. En otras palabras, la evolución las dotó de las ventajas de los

dos tipos de planeo: por un lado, su gran talla les permitiría aprovechar el planeo dinámico cuando el viento arreciaba, y por el otro, la gran superficie y el contorno alargado de sus alas las capacitaba para volar con placidez sobre las aguas calmadas durante miles de kilómetros. El mayor pelagornítido pudo viajar tales distancias con relativa rapidez. Nuestros cálculos sitúan la velocidad óptima de estos gigantes en más de 40 kilómetros por hora, superior a la del velocista Usain Bolt cuando batió el récord mundial de los 100 metros lisos, recorridos en 9,58 segundos, o sea, a 37,6 kilómetros por hora. Además, *P. sandersi* pudo mantener esa velocidad con poco esfuerzo: le bastaba con ganar 45 metros de altitud para deslizarse más de un kilómetro sin batir las alas o sin contar con impulso del viento.

P. sandersi seguramente pasaba la mayor parte del tiempo en el aire, pero en algún momento tendría que tomar tierra (para anidar, por ejemplo), lo que exigiría volver a despegar. Las diminutas patas de los pelagornítidos hacen dudar a algunos de su capacidad para despegar con facilidad. Pero los esqueletos más completos, como los de *P. chilensis* y *P. sandersi*, demuestran que la extremidad inferior de estos gigantes estaba muy bien proporcionada con respecto a su cuerpo compacto. El primer estudio cuantitativo de la capacidad de despegue de los pelagornítidos gigantes presentado por Habib en una reunión internacional de paleontología mostró que las cortas y robustas patas traseras de *Pelagornis* tenían la proporción y la implantación idóneas para lanzar a su poseedor en carreras cortas y rápidas, en especial sobre la superficie del agua (seguramente los dedos de *Pelagornis* estaban unidos por una membrana). Los huesos de las extremidades posteriores eran lo bastante robustos como para soportar la notable masa muscular necesaria para impulsar su cuerpo, de tamaño modesto (con alas desmesuradas) y remontar el vuelo. Tales rasgos permitirían a *P. sandersi* despegar con soltura desde el agua, aunque caminaría con torpeza en tierra firme.

UN NICHO VACANTE

El descubrimiento de *P. sandersi*, un titán entre gigantes, plantea la cuestión de por qué estas aves voladoras alcanzaron semejante tamaño. El gigantismo no es una ventaja universal en biología. Los animales voluminosos precisan más alimento, pueden requerir zonas de anidamiento más extensas y suelen ser menos numerosos que los más menudos. Pero a pesar de tales inconvenientes, a lo largo de la historia de la vida en la Tierra han surgido muchos linajes de voladores gigantes. El hecho de que no existan en la actualidad es una excepción, pues han surcado el cielo durante la mayor parte de los últimos 120 millones de años.

Un tamaño corporal grande ofrece ventajas notables. En primer lugar, se mejora la eficacia del vuelo a larga distancia, ya que los voladores corpulentos consumen menos energía por unidad de distancia recorrida que sus homólogos más pequeños. Los más grandes también pueden arrebatar las presas a los pequeños. Por otra parte, el gigantismo reduce el riesgo de depredación en el aire, pues la talla le hace a uno casi inmune a los depredadores.

Durante millones de años los pterosaurios dominaron el aire sobre el mar y la tierra firme. Las especies marinas probablemente se alimentaban de invertebrados y peces y su silueta corporal estaría adaptada a los distantes viajes oceánicos. Durante un tiempo gozaron de la hegemonía. Pero el mismo asteroide que acabó con los dinosaurios (salvo las aves que, en realidad, son dinosaurios vivientes) también los condenó a la desaparición. Con su extinción, la competencia entablada entre reinos desapareció de repente dejando vacantes los nichos ecológicos que habían ocupado. Uno de ellos fue el de los grandes planeadores marinos.

Los pelagornítidos parecen haber ocupado ese nicho unos 10 millones de años después de que desapareciese el último pterosaurio. Sus fósiles proceden casi en exclusiva de depósitos de sedimentos formados en ambientes marinos, por lo que las presas marinas debían ser con seguridad el pilar de su dieta. Puesto que sus pseudodientes eran más frágiles que los dientes verdaderos, algunos paleontólogos especulan que su alimentación se componía de animales de cuerpo blando, como los calamares y las anguilas, que atrapaban a flor de agua. Tal vez también fueran carroñeros. Algunas aves marinas acosan a otras para arrebatarles la comida hasta el extremo de hacerlas regurgitar las presas, como hace el págalo. Los pelagornítidos debían ser ciertamente las aves más grandes de su entorno, por lo que sin duda pudieron robar la comida a otras más pequeñas. También pudieron capturar a polluelos en los nidos, práctica común de los petreles gigantes, los págalos y algunos pelícanos.

Los pelagornítidos no eran las únicas aves colosales que pudieron ocupar el nicho ecológico dejado por los pterosaurios. Otro grupo de grandes aves voladoras, los teratornítidos, surgió hace unos 23 millones de años y sobrevivió hasta el final del Pleistoceno, hace apenas 12.000 años. De alas más cortas y anchas y cuerpo más pesado, probablemente volaban y cazaban de un modo similar a los cóndores.

Después de dominar los cielos marinos durante más de 50 millones de años, los pelagornítidos desaparecieron por completo hace unos tres millones de años, en el Plioceno. La causa fundamental de su extinción sigue siendo una incógnita. El Plioceno fue un período de muchos cambios debido a la formación del istmo de Panamá, que separó las masas del Atlántico y del Pacífico y alteró drásticamente las corrientes oceánicas. Pero resulta difícil imaginar que este suceso pusiera fin a un linaje que había sobrevivido a numerosos cambios del clima, de la circulación oceánica y de la fauna.

Tal vez la especialización en grado sumo tuviese algo que ver con su extinción. Cuando el grupo comenzó a diversificarse surgieron especies más pequeñas, de la talla de los albatros actuales. Con el tiempo, estos representantes menudos se extinguieron y durante la segunda mitad de la historia de los pelagornítidos solo sobrevivieron los más grandes. Estos gigantes pudieron haber tenido una estrategia trófica sumamente especializada, mucho más dependiente de las corrientes planetarias del viento que las aves marinas más pequeñas y, en última instancia, acabaron siendo víctimas de su éxito.

PARA SABER MÁS

Constraining the air giants: Limits on size in flying animals as an example of constraint-based biomechanical theories of form. Michael Habib en *Biological Theory*, vol. 8, n.º 3, págs. 245-252, septiembre de 2013.
Flight performance of the largest volant bird. Daniel T. Ksepka en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 111, n.º 29, págs. 10.624-10.629, 22 de julio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aves gigantes voladoras. Mioceno de Sudamérica. Paul Palmqvist, Sergio F. Vizcaíno y Richard A. Fariña, agosto de 2001.
Origen de las aves modernas. Gareth Dyke en *IyC*, septiembre de 2010.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Física del botijo

La evaporación del agua a través de un material poroso permite construir recipientes refrigeradores sencillos y eficaces

¡Qué delicia aplacar la sed con un trago de agua fresca en una calurosa jornada de verano! Para ello no hacen falta cubitos de hielo ni frigorífico: el tradicional botijo español, de barro cocido sin esmaltar, puede conservar su contenido a una temperatura inferior en más de diez grados a la ambiente. De hecho, el principio físico en el que se basa su funcionamiento ha llegado a inspirar en África la construcción de una nevera rudimentaria, consistente en una doble tinaja. ¿A qué se debe su eficacia?

El principio del botijo es simple. La superficie de la vasija permanece húmeda porque el agua atraviesa la arcilla porosa. Y, gracias a su evaporación, el recipiente se enfría. Podemos, no obstante, hacernos algunas preguntas acerca de este proceso.

Enfriamiento por evaporación

Comencemos por el origen del enfriamiento a causa de la evaporación del agua. El agua líquida es un estado de la materia en el que cada molécula se halla en contacto con sus vecinas. En un gas, en cambio, las moléculas están alejadas unas de otras e interaccionan poco.

Pasar de la fase líquida a la gaseosa requiere, por tanto, aportar la energía necesaria para romper los enlaces intermoleculares que aseguran la cohesión del líquido. En ausencia de una fuente externa de calor (una placa caliente, etcétera), esa energía se extrae, en última instancia, de la energía de agitación térmica de las moléculas. Como consecuencia, estas reducen su velocidad y la temperatura baja.

El rendimiento de este proceso es particularmente alto. Aunque bastan 4,18 julios para elevar un grado la temperatura de un gramo de agua, la energía necesaria para que se transforme en vapor —conocida como «calor latente de vaporización»— asciende a... ¡2250 julios! Por esa misma razón, sudar nos ayuda a mantener nuestra temperatura corporal cuando acecha el calor. Por ejemplo, durante un esfuerzo físico continuado en bicicleta, el cuerpo desarrolla una potencia mecánica de unos 300 vatios, mientras que la potencia térmica ronda los 1000. La evaporación de un litro de agua por exudación permite evacuar el calor generado por el organismo durante 38 minutos. Sin ese proceso, nuestra temperatura corporal aumentaría en más de 5 ºC.

Sin embargo, el rendimiento del proceso depende también de la humedad del aire. Cuando la cantidad de vapor de agua presente en el aire ambiente alcanza cierto umbral (el «100 por cien de humedad»), el número de moléculas de agua procedentes del aire que entran en contacto con el líquido y se incorporan a él iguala al de moléculas del líquido que, por evaporación, pasan al aire.

En esa situación, en la que el aire se encuentra saturado de vapor de agua, el flujo de condensación y el de evaporación están equilibrados, y lo mismo ocurre con los flujos de energía. No es posible, por tanto, conseguir enfriamiento alguno. En cambio, cuanto más seco esté el aire ambiente, tanto más elevada resultará la tasa de evaporación y, con ella, el consiguiente enfriamiento.

De igual modo, la humedad del aire marca la diferencia entre una sauna y un baño turco. En una sauna somos capaces de soportar aire a una temperatura de 95 ºC porque está seco (con una humedad del orden del 10 por ciento), lo que permite que el sudor se evapore con facilidad. En un baño turco, en cambio, el aire se encuentra saturado de humedad. Transpiramos mucho, pero sin que la evaporación evacue el calor corporal, por lo que la temperatura no puede rebasar los 50 ºC.

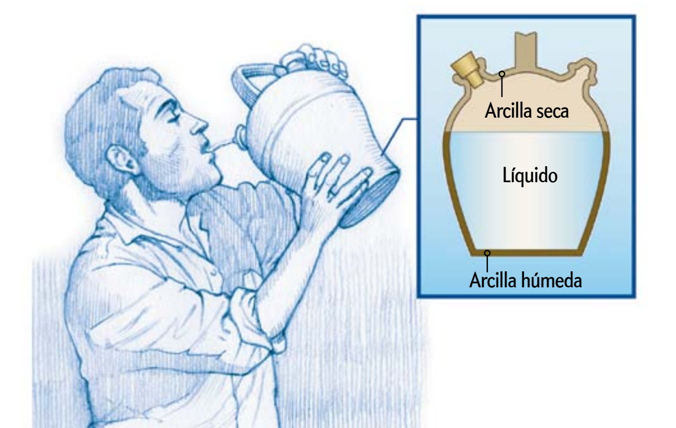
LA TRANSPIRACIÓN ayuda a enfriar el cuerpo. Al evaporarse, el agua absorbe calor, que de esta manera se transfiere desde el organismo hacia el exterior. Cuanto más seco está el aire ambiente, como en una sauna (*ilustración*), más intensa es la evaporación. En un baño turco, en cambio, la humedad del aire reduce la evaporación, por lo que el agua se condensa sobre la piel y en otras superficies.

BRUNO VACARO

Evaporación en un recipiente

Detallemos ahora el proceso de evaporación en un recipiente. Para simplificar, supondremos que el aire ambiente se encuentra perfectamente seco.

Algunas moléculas de agua abandonan el líquido. Si estuviesen en el vacío, se alejarían de la superficie y la cantidad de agua evaporada por unidad de tiempo sería elevada y constante. Pero, en el aire, sufren numerosas colisiones (miles de millones por segundo) contra las mo-



EL BOTIJO, un recipiente de arcilla porosa, puede mantener el agua a una temperatura inferior en 10 o 15 grados a la ambiente. El líquido atraviesa los poros de la arcilla y llega al exterior, desde donde se evapora. Debido al elevado calor latente del agua, dicho proceso enfría con gran eficiencia el recipiente y su contenido.

léculas de nitrógeno y de oxígeno. Esos choques modifican constantemente la velocidad y la dirección de las moléculas de agua, lo que les impide alejarse con rapidez. Por tanto, se difunden con lentitud desde la interfase líquido-gas. Esa difusión lenta tiene como consecuencia la acumulación de moléculas de agua: la concentración de vapor aumenta poco a poco hasta llegar a la saturación.

¿Cesan entonces la evaporación y el consiguiente enfriamiento? La difusión reduce la evaporación de las moléculas de agua, pero no la anula, ya que el aire más lejano sigue sin estar saturado. A ello se añade la convección; es decir, el movimiento del aire ambiente (viento, corrientes de aire, etcétera), el cual puede dispersar el vapor de agua próximo a la superficie y reforzar así la evaporación.

Sin embargo, el descenso de temperatura no prosigue de manera indefinida, ya que aparecen también transferencias térmicas: si la temperatura del agua líquida se hace inferior a la del aire ambiente, surge un flujo de calor en el sentido inverso, el cual tiende a calentar el agua. Al igual que los intercambios de masa, tales intercambios de calor dependen de los fenómenos de difusión y de convección.

Arena húmeda

NEVERAS SIN ELECTRICIDAD: A finales del siglo pasado, el docente nigeriano Mohammed Bah Abba ideó un frigorífico rudimentario basado en la evaporación. En él, el espacio entre dos tinajas encajadas se mantiene lleno de arena húmeda. La evaporación a través de la superficie exterior enfría el recipiente, que puede contener alimentos sólidos. Es posible taparlo con un paño húmedo, lo que también contribuye al enfriamiento.

BRUNO VACARO

En el aire, los intercambios de masa y de calor resultan equiparables. De esta manera, se llega a una situación estacionaria en la que el enfriamiento por evaporación se compensa con la entrada de calor, lo que mantiene el líquido a una temperatura inferior a la del entorno.

En el caso de una botella común de vidrio, la convección resulta poco eficiente, ya que el objeto se encuentra rematado por un cuello estrecho. Además, la transmisión térmica a través de la superficie de la botella es elevada, ya que el vidrio es un buen conductor térmico. Así que, aunque hay evaporación, esta resulta ínfima (para comprobarlo, déjese una botella llena al aire libre), por lo que el enfriamiento es insignificante.

Botijos y tinajas dobles

¿Por qué el botijo, el *zahato* (la bota de piel tradicional de los pastores vascos) o incluso las antiguas ánforas son tan eficientes? El botijo es un recipiente de arcilla porosa. Seco, este material es un buen aislante térmico, y como tal se comporta por encima del nivel del líquido. Por debajo, sin embargo, la porosidad de la arcilla permite que el líquido se filtre hasta la superficie del recipiente. Esto tiene dos efectos.

El primero es negativo. Al invadir los poros, el agua —un buen conductor térmico— reemplaza al aire, por lo que el efecto de aislamiento térmico de la arcilla seca se pierde en parte. Pero el segundo efecto es positivo, ya que el agua puede evaporarse (y, de esta manera, enfriar el líquido encerrado) a través de toda la superficie de la vasija, y no solo en la superficie del líquido. Además, en el botijo, la convección no se ve limitada por un cuello estrecho.

Por otro lado, para cualquiera que sea la altura del líquido contenido, los intercambios de calor y la evaporación se producen en una misma superficie. Si esta disminuye a la mitad, los intercambios de calor y de masa se reducen ambos también a la mitad y, en última instancia, la temperatura de la bebida se mantiene constante, incluso si baja el nivel. En general, un botijo consigue rebajar la temperatura entre 10 y 15 grados con respecto a la ambiente. Por supuesto, el precio que hemos de pagar es la evaporación de parte del líquido. Pero se trata de una fracción pequeña: para que se evaporase toda el agua, tendríamos que esperar unos treinta días.

El botijo, que solo enfría líquidos, inspiró a finales del pasado siglo al nigeriano Mohammed Bah Abba (1964-2010). Hacia 1995, este docente concibió un «frigorífico» que, sin necesidad de electricidad, permitió mejorar la conservación de alimentos en su país. ¿La idea? Insertar arena húmeda en el espacio situado entre dos tinajas encajadas de barro cocido. Si la arena se mantiene húmeda, la temperatura interior será la correspondiente a la del líquido del botijo. Por supuesto, no alcanzará los 4 ºC de una nevera eléctrica, pero, en regiones cálidas y carentes de electricidad, quince grados menos pueden mejorar mucho la conservación de alimentos y de medicinas sensibles a la temperatura.

PARA SABER MÁS

Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions. N. M. Nahar et al. en *Building and Environment*, vol. 38, n.º 1, págs. 109-110, 2003.

Transferts thermiques (5.ª edición). J. Taine et al. Dunod, 2014.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Correlación no implica causalidad

De las promesas del *Big Data* a los usos y abusos de la estadística

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, que hace cuatro años encontró el bosón de Higgs, emplea 150 millones de sensores que generan 40 millones de datos por segundo. El 14 de febrero de 2013, cuando cesó temporalmente su actividad por cuestiones de mantenimiento, acumulaba de sus últimos tres años de experimentos el equivalente a 700 años de películas en alta definición.

Ese ritmo de generación de datos no es exclusivo de las grandes instalaciones científicas: se estima que el tráfico global mensual de datos de telefonía móvil asciende a unos escalofriantes 11 exaoctetos (11.000 millones de gigaoctetos, o *gigabytes*). Si pensamos en Internet y en la cantidad de cachivaches digitales que nos rodean, no extraña que un reciente informe de IBM apuntase que, solo en los últimos dos años, se había generado el 90 por ciento de todos los datos digitales existentes.

Para explorar ese océano de información ha nacido una nueva disciplina: el tratamiento de macrodatos, o *Big Data*. Este hermano forzudo de la estadística se ocupa, en primer lugar, de superar los problemas que plantea buscar, obtener o almacenar esas pantagruélicas masas de información. Y, más delicado e interesante aún, de analizar y visualizar tales datos, en general dispersos y sin clasificar, para extraer información relevante que permita tomar decisiones. Los macrodatos prometen a científicos, Gobiernos y grandes empresas hacer emerger de manera automática relaciones hasta ahora ocultas entre todo tipo de variables.

Sin embargo, dado que vender algo nuevo en un mercado saturado siempre es difícil, algunos seguidores acérrimos del *Big Data* se han venido arriba y han prometido una manera «automática» de hacer nuevos descubrimientos científicos. Algo que recuerda vagamente al programa formalista de Hilbert, pero esta vez en ciencias. Opinan que, con los algoritmos adecuados, podremos encontrar inimaginables correlaciones y regularidades en semejantes cantidades de datos. En palabras de Chris Anderson, que como editor de la célebre revista tecnológica *Wired* levantó polémica en 2008: «No hay necesidad de semántica o de análisis causal. La correlación es suficiente. Podemos introducir los números en el mayor conjunto de ordenadores del mundo y los algoritmos encontrarán patrones donde la ciencia no puede».

Ante semejante optimismo desatado, ha habido respuestas contundentes que han demostrado que, en bases de datos muy grandes, aparecen siempre correlaciones arbitrarias, no debidas necesariamente a la naturaleza de los datos, sino solo a su cantidad. Tales argumentos se basan en la teoría ergódica, la teoría de Ramsey o la teoría algorítmica de la información, entre otras herramientas.

Cum hoc

Con todo, resulta más fácil y gráfica la explicación aportada por Tyler Vigen, estudiante de criminología de Harvard, quien hace poco desarrolló un programa que detecta automáticamente correlaciones entre conjuntos de datos de lo más variopinto. Una rápida búsqueda en su página web (tylervigen.com/spurious-correlations) nos revelará correlaciones estrambóticas, como la existente entre el gasto en I+D de EE.UU. y el número de suicidios por ahorcamiento, estrangulamiento o asfixia a lo largo de una década; o la tasa de divorcios en Maine y el consumo per cápita de margarina, también durante diez años.

¿Cómo cuantifican los estadísticos la bondad de una correlación? El coeficiente de correlación lineal más empleado es el de Pearson, el cual suele denotarse por r y toma un valor comprendido entre +1 y –1. Los extremos indican máxima correlación y anticorrelación, respectivamente, mientras que el valor 0 indica su ausencia. En los dos ejemplos surrealistas de Vigen, $r = 0{,}99$. ¿Significa eso que el incremento en gasto en I+D es responsable del aumento de suicidios, o que cuanta más margarina use una pareja, más probable será que sus miembros se divorcien?

Resulta difícil mantener ambas cosas, ya que correlación no implica causalidad. Estamos sin duda ante correlaciones espurias. La palabra *espurio* procede del latín *spurius* y posee dos acepciones: «bastardo, degenerado desde su origen» y la que nos interesa aquí, «engañoso o falso». Esta última es la empleada en estadística y fue propuesta por primera vez en 1897 por Karl Pearson para referirse a las correlaciones ilusorias. Aprovecho para advertir que *espúreo* es incorrecto, a pesar de que se encuentra muy extendido incluso entre gente culta, como comentaba Lázaro Carreter en *El dardo en la palabra*, donde confesaba haberlo utilizado alguna vez.

Cuando los estadísticos hablan de la correlación de Pearson entre dos variables se refieren a una buena o mala relación lineal entre ellas. Sin embargo, la causalidad hace referencia a que un suceso constituya el resultado de otro. Causalidad siempre implica correlación, pero la correlación no necesariamente implica causalidad. La cantinela de «correlación no implica causalidad» viene de lejos y se conoce también como falacia *cum hoc ergo propter hoc*, «con esto y, por tanto, a causa de esto».

La versión débil de la correlación espuria puede condensarse en otra famosa expresión latina: *post hoc ergo propter hoc*, «después de esto y, por tanto, a causa de esto». Se trata de una conocida falacia, donde se da por sentado que, si A sucedió antes que B, entonces A debe haber causado B. En este caso, se estira demasiado el hecho de que, efectivamente, las causas preceden a los efectos.

Suena tan absurdo que pensamos que nadie puede caer en semejante trampa mental, pero está al orden del día en esta sociedad tan tecnocientífica como

irracional en la que vivimos. Verbigracia: «¡Pues yo he tomado homeopatía y me he curado!». Es más, cuando encontramos correlación entre dos variables, y aun suponiendo que exista causalidad entre ellas, tampoco estamos capacitados para determinar cuál es la causa y cuál el efecto. Un ejemplo histórico, que hoy nos suena patético, fue la defensa que hicieron las tabacaleras ante la alta correlación entre cáncer y tabaco: los enfermos de cáncer fumaban para aliviar los dolores, argumentaban los muy sagaces.

Propter hoc

De todas maneras, ¿cómo es posible que existan correlaciones tan altas en variables entre las que no hay ningún vínculo causal? Una posibilidad, como ocurre en los casos de Vigen, es el puro azar. Abordemos la cuestión de una manera inocente, sin usar la teoría de Ramsey ni matemáticas elaboradas.

Supongamos una serie temporal $x(t)$ de 10 puntos ($t = 0, 1, 2, ..., 9$), como las que aparecen en los gráficos. Podemos convertirla en una serie de 9 ascensos y descensos, como:

$$\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow \cdots \uparrow\downarrow ,$$

donde $\uparrow$ significa:

$$x(t+1) - x(t) > 0$$

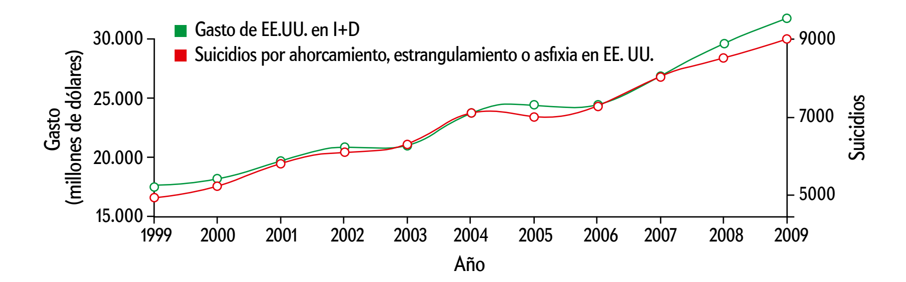
y $\downarrow$ simboliza:

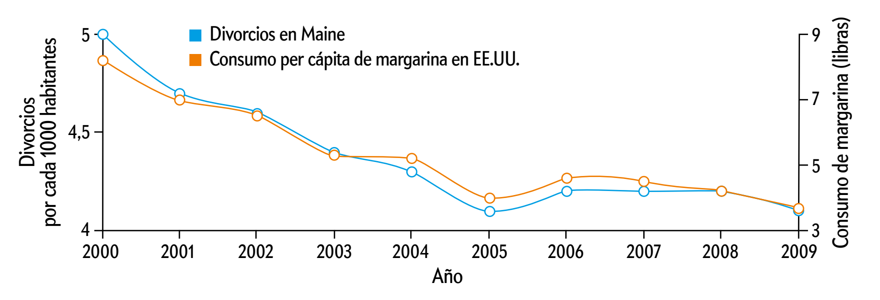
$$x(t+1) - x(t) < 0 .$$

De manera cualitativa, otra serie temporal en otra variable, $y(t)$, se correlacionará positivamente con $x(t)$ si exhibe una secuencia idéntica de subidas y bajadas, y negativamente si exhibe la secuencia opuesta.

Para diez valores tenemos, por tanto, $2^9 = 512$ posibles secuencias. Si tomamos dos de ellas al azar, la probabilidad de que se correlacionen positiva o negativamente será de $2/512 = 1/256$. Ahora supongamos que disponemos de 23 series temporales y que escogemos dos de ellas. El número de posibles parejas viene dado por el coeficiente binomial $C(2,23) = 253$. Por lo que, en promedio, siempre podremos esperar encontrar una correlación o anticorrelación por pura suerte.

Otra posibilidad para generar correlaciones espurias es la existencia de una variable oculta. Martin Gardner nos alertaba de ellas hace ya años con ejemplos como la correlación entre el tamaño de los pies y la habilidad para sumar: los niños con pies grandes suman mejor. ¡Claro!





CORRELACIONES ESPURIAS: En conjuntos de datos lo suficientemente amplios siempre es posible encontrar correlaciones casi perfectas entre variables disparatadas. Estas gráficas muestran dos ejemplos recopilados por Tyler Vigen, estudiante de criminología de Harvard. En ambos casos, el coeficiente de correlación es $r > 0{,}99$.

Simplemente tienen más edad, la variable oculta que hace de puente causal.

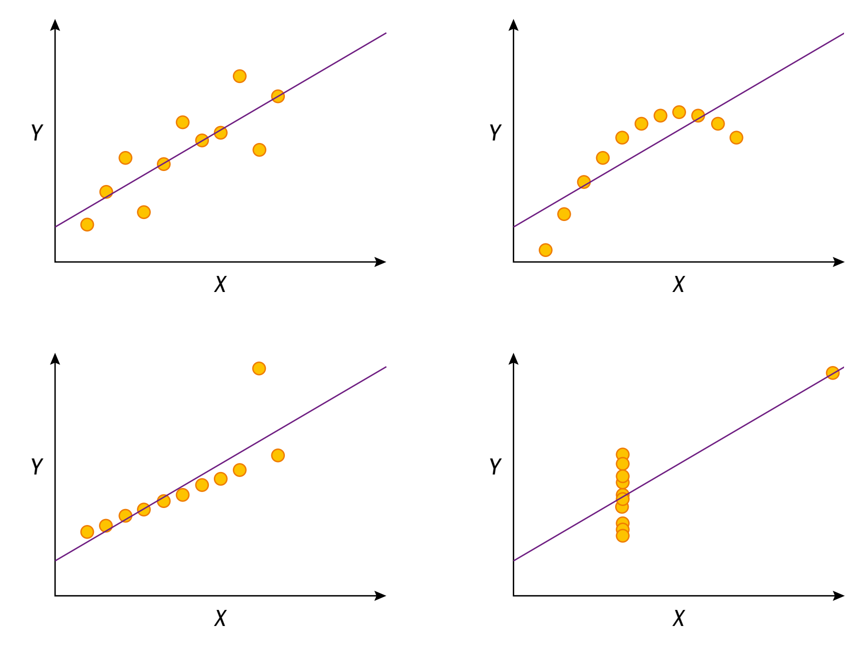
En el clásico sobre falacias estadísticas *How to lie with statistics* (1954), Darrell Huff pone como ejemplo la correlación entre el salario de los ministros presbiterianos de Massachusetts y el precio del ron en La Habana. ¿Cuál es aquí la causa y cuál el efecto? Sin duda, la cuestión resulta disparatada, como en los ejemplos de Vigen. Y que el salario y los precios crezcan a la par no es más que consecuencia de que, con el paso de los años y a nivel mundial, todo es cada vez más caro.

Ciencia espuria

A pesar de que en todas las clases de estadística del planeta se repite una y otra vez la cuestión, siguen apareciendo estudios científicos que caen de una forma u otra en esta vieja falacia. Por ejemplo, cuando se generalizó la terapia de sustitución hormonal (TSH) para amortiguar efectos no deseados de la menopausia, los investigadores hicieron notar que las mujeres que la adoptaban parecían sufrir menos cardiopatías. Algunos estudios adelantaron una relación causal: la TSH reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, investigaciones posteriores descubrieron la variable oculta: las mujeres que estaban tomando TSH pertenecían en su mayor parte a grupos socioeconómicos altos, con dietas más sanas y hábito de ejercicio. Cuando se realizaron pruebas a doble ciego con grupos homogéneos para evitar las variables ocultas, se descubrió que, de hecho, el TSH aumentaba ligeramente el riesgo.

Veamos algunos ejemplos más que en su momento tuvieron gran repercusión mediática. En 2000 se publicó un discutido artículo en *Nature* que apuntaba a una fuerte asociación entre miopía y exposición nocturna en niños menores de dos años: los niños que dormían con la luz encendida mostraban una probabilidad cinco veces mayor de desarrollar miopía. Un año después, un estudio publicado también en *Nature* refutaba el resultado señalando que la verdadera causa de la miopía infantil era genética, no ambiental. El trabajo encontraba una fuerte conexión ente la miopía parental y la miopía en desarrollo en niños, haciendo notar, además, que los padres miopes suelen dejar encendida una luz en la habitación de sus vástagos.

En 2012, la revista *New England Journal of Medicine* publicó un artículo cuya conclusión era que el consumo de chocolate mejoraba la función cognitiva. ¿En qué basaban su afirmación los investigadores? Pues en una fuerte correlación entre el número de premios nóbel de una nacionalidad y el consumo per cápita de chocolate en su país. Aquí nos encontramos frente a lo que se conoce como «falacia ecológica»: se alcanza una conclusión sobre individuos a partir de datos agregados de grupos. Se encuentra una correlación para la población de un país



CUARTETO DE ANSCOMBE: La falta de correlación no indica independencia. Estas cuatro gráficas, conocidas como el «cuarteto de Anscombe», fueron concebidas en 1973 por el estadístico inglés Frank Anscombe para enfatizar la importancia de visualizar los datos antes de elegir el tipo de análisis. Todos los casos muestran dos conjuntos de datos, *X* e *Y* (*naranja*), con el mismo coeficiente de correlación lineal, $r = 0{,}816$ (*ajuste violeta*). Sin embargo, solo el primer gráfico muestra una relación lineal. La segunda y la cuarta gráfica revelan relaciones no lineales a las que no puede aplicarse el coeficiente *r*. La tercera refleja una relación lineal perfecta excepto por un dato fuera de lugar, el cual baja el coeficiente de correlación a 0,816.

y se extrapolan conclusiones para algunos de sus habitantes, los premios nóbel. Pero el consumo real de los laureados les era totalmente desconocido a los investigadores. A pesar de este error elemental, que fue muy criticado en su momento por la comunidad, la prensa se hizo buen eco del resultad. De hecho, el artículo aún no ha sido retirado y goza de 42 citas en el momento de escribir estas líneas.

Niños y cigüeñas

Correlación no implica causalidad. Pero, contrariamente a lo que muchos piensan, una correlación nula tampoco implica independencia. Por ejemplo, una relación funcional en forma de U entre dos variables puede dar una correlación lineal nula. El coeficiente de correlación de Pearson fue creado para determinar la correlación lineal entre variables, por lo que, si hay correlación pero esta es no lineal, podremos encontrar cualquier valor.

Tales malentendidos fueron los que, en 1973, llevaron al estadístico inglés Frank Anscombe a divulgar el hoy llamado «cuarteto de Anscombe». Sin embargo, seguimos viendo trabajos científicos que caen en el mismo error.

Hace unos años, por ejemplo, estudios con ratas de laboratorio sobre la ingesta de DEHP, un componente que añadido al plástico lo hace más flexible, apuntaban a que dicha sustancia aumentaba la actividad de la aromatasa, una enzima que induce masculinización cerebral. El problema en estos casos reside en que, a menudo, los toxicólogos dan por sentado que los tests donde se administran dosis altas revelan los efectos más rápidamente y con menor ambigüedad que aquellos en los que se usan dosis bajas durante periodos prolongados. Y esos ensayos solo habían utilizado dosis elevadas. Más tarde, Anderson Andrade, del Hospital Universitario Charité de Berlín, y sus colaboradores mostraron que, a bajas dosis, el DEHP suprimía la aromatasa: un efecto no lineal totalmente inesperado.

Para terminar, y como ejemplo de que no debemos pedir a la estadística más de lo que puede darnos, el siempre sorprendente Robert Matthews retomó hace unos años el conocido ejemplo de correlación espuria entre tasa de nacimientos y población de cigüeñas que en 1952 propuso el matemático polaco Jerzy Neyman. En un artículo titulado «Las cigüeñas traen los bebés ($p = 0{,}008$)», Matthews aborda la cuestión del mismo modo en que lo haría cualquier investigación donde se sospechase la existencia de una correlación, entre dos variables (como, por ejemplo, dieta y cáncer).

Matthews usa un contraste de hipótesis, donde la hipótesis nula es la ausencia de correlación entre las tasas de nacimiento anuales y el número de parejas de cigüeñas blancas (*Ciconia ciconia*) en 17 países europeos. Una regresión lineal de los 17 pares de puntos arroja un coeficiente de correlación lineal de $r = 0{,}62$, no especialmente alto. Sin embargo, un test *t* estándar (una técnica estadística habitual en estos casos) revela que el resultado es significativamente alto, puesto que arroja un valor *p* de 1/125.

En general, el valor *p* indica la probabilidad de obtener un resultado como el observado si asumimos que la hipótesis nula es cierta. En nuestro caso, eso quiere decir que, si no existe una correlación entre nacimientos y cigüeñas, la probabilidad de toparnos con una correlación positiva como la obtenida es de 1 entre 125. Pero, atención, contrariamente a lo que muchos investigadores piensan, eso no implica que la probabilidad de que todo se deba a una mera coincidencia sea de 1/125. Ni, menos aún, que la probabilidad de que las cigüeñas traigan a los bebés sea de 124/125.

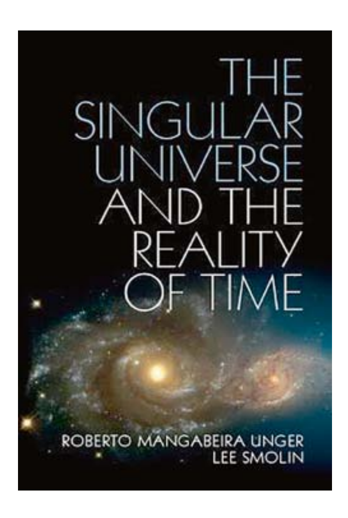
La explicación más plausible, como apunta el propio Matthews, es la existencia de una variable oculta, como la extensión de los países. Este caso nos muestra, más allá de que correlación no implica causalidad, que es necesario entender el significado preciso del tan querido para muchos investigadores valor *p*, y que rechazar una hipótesis nula no implica que la hipótesis alternativa sea correcta. IyC

PARA SABER MÁS

Myopia and ambient night-time lighting. Karla Zadnik et al. en *Nature*, vol. 404, págs. 143-144, marzo de 2000.
Storks delivers babies ($p = 0.008$). Robert Matthews en *Teaching Statistics*, vol. 22, págs. 36-28, verano de 2000.
Chocolate consumption, cognitive function, and Nobel laureates. Franz H. Messerli en *The New England Journal of Medicine*, vol. 367, págs. 1562-1564, octubre de 2012.
What everyone should know about statistical correlation. Vladica M. Velickovic en *American Scientist*, vol. 103, enero-febrero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una sociedad dirigida por datos. Alex P. Pentland en *IyC*, enero de 2014.
El valor resbaladizo de *p*. Regina Nuzzo en *IyC*, diciembre de 2014.



THE SINGULAR UNIVERSE AND THE REALITY OF TIME
A PROPOSAL IN NATURAL PHILOSOPHY
Roberto Mangabeira Unger y Lee Smolin
Cambridge University Press, 2015

Un universo singular

... y unas leyes de la naturaleza temporales

Escrito por el filósofo Roberto Mangabeira Unger y el físico Lee Smolin, el libro propone un replanteamiento radical de la cosmología. A partir del reconocimiento de la realidad del tiempo y de la historicidad del universo, se infiere que todo cambia, incluidas la estructura y las leyes de la naturaleza. A mediados de los noventa, Smolin postuló que los agujeros negros engendraban universos bebés. Un decenio después, escribió un ataque cáustico contra la teoría de cuerdas, que había fracasado a la hora de aportar una sola predicción contrastable. En 2013 publicó *Time reborn*, donde exponía las ideas que aquí retoma. Robert Mangabeira enseña en la facultad de derecho de Harvard.

El libro se divide en dos partes: una filosófica, a cargo de Unger, y otra científica, de Smolin. Conviene empezar por la segunda, más sólida y clara, frente a la farragosidad repetitiva de la primera. Unger y Smolin buscan desarrollar métodos y principios de una nueva filosofía de la naturaleza. Toman como puntos de partida tres conceptos: la existencia singular del universo, la realidad inclusiva del tiempo y el realismo selectivo de la matemática.

La existencia singular no alude a la singularidad relativista, que indica que la curvatura del espaciotiempo y otras magnitudes se hacen infinitas. (De hecho, los autores niegan que el universo pueda ser singular en ese sentido.) Singular es aquí un adjetivo que expresa la existencia real de un solo universo en cualquier momento que consideremos. Nuestro universo no es uno entre muchos. No hay otro; no existe un multiverso o una pluralidad de universos simultáneos, un recurso teórico del que se echa mano para obviar aporías de la física contemporánea. Y rematan: las cosmologías que consideran un multiverso se basan en un razonamiento falaz, un concepto metafísico incapaz de contrastarse empíricamente [*véase* «¿Existe el multiverso?», por George Ellis; Investigación y Ciencia, octubre de 2011].

La realidad inclusiva del tiempo significa que no se trata de un concepto emergente. No deriva de la idea de espacio, aunque el espacio pueda emerger del tiempo. Ese carácter inclusivo y real del tiempo comporta que en la naturaleza no haya nada que dure para siempre. Todo cambia, hasta el propio cambio. Las leyes de la naturaleza dejan de ser atemporales y permanentes. El universo ha atravesado diversas fases. La cosmología se convierte en una disciplina histórica, a la manera de la biología o la geología. En su teoría general de la relatividad, Einstein sustituyó el espacio y el tiempo absolutos de la física newtoniana por una concepción del espaciotiempo que era relacional y dinámica. Pero no alteró, sino que reafirmó la noción de un marco inmutable de las leyes de la naturaleza. Smolin, por el contrario, cohonesta la temporalidad de las leyes con la temporalidad o naturaleza histórica del universo y de cuanto contiene. Las leyes y el universo entero han de someterse a los efectos del tiempo.

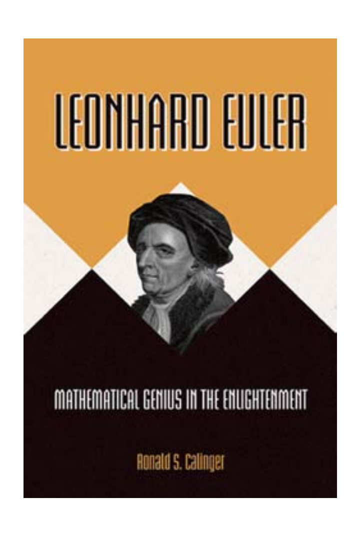
En lo concerniente al tercer concepto básico, el realismo selectivo de la matemática, los autores impugnan el platonismo matemático, doctrina que defiende la existencia real de las entidades matemáticas. No inventamos los formalismos matemáticos, solo los descubrimos. (El platonismo matemático se origina con Frege, con un precedente en Kant, y se desarrolla a través de Quine y otros como parte de la explicación del fundamento de la matemática.) Los objetos mentales tienen su propia realidad. En ese marco han de entenderse su oposición a la idea de que las leyes de la naturaleza tengan que escribirse en el lenguaje de la matemática. La matemática se ocupa de la naturaleza (considerada en sus aspectos más generales) y de ella misma.

La existencia singular del universo, la realidad inclusiva del tiempo, que entraña la mutabilidad de las leyes de la naturaleza, y el realismo selectivo de la matemática tienen todas justificación por sí mismas. No obstante, se trata de algo más que de un trío de proposiciones con una vaga relación. Cuanto más profundamente las comprendemos y cuanto más apreciamos las razones de sustentarlas, más claramente admitiremos sus profundas interacciones. Representan tres lados de la misma visión comprehensiva. Se prestan mutuo apoyo y se refinan entre sí.

A la hora de buscar precedentes, encuentran inspiración en Leibniz y en Ernst Mach. Ambos presentarían un planteamiento racional de la naturaleza y la prioridad del llegar a ser sobre el ser. Una inspiración relativa, se encargan de subrayar. A la hora de buscar equiparaciones con otros empeños teóricos, no se andan con rodeos. La búsqueda actual de una teoría del todo —de las fuerzas y campos fundamentales de la naturaleza— procede, afirman, con el supuesto de admitir regularidades y constituyentes elementales como algo permanente; por eso, sentencian, falla en lo que constituye el gran descubrimiento cosmológico: la historicidad del universo.

La expresión «filosofía natural» constituye la premisa básica de la obra. Así se llamaba la ciencia en tiempos de Galileo, Newton e incluso Darwin, para distinguirla de la filosofía propiamente dicha. De hecho, el término *científico* lo introdujo William Whewell, mentor de Darwin, en 1832. La filosofía natural no ha desaparecido del todo. Vive bajo la indumentaria de libros de divulgación científica escritos por especialistas para las personas cultas no especialistas. Recurren a esos libros para especular sobre el significado de sus descubrimientos para nuestra comprensión del universo y de nuestro lugar en el mismo. Tampoco rechazan su lectura por colegas. La filosofía natural toma la naturaleza como objeto de análisis, no la ciencia, y cuestiona la agenda y métodos establecidos en las ciencias particulares. El libro de Unger y Smolin, si no lo es, se parece mucho a un ensayo de filosofía natural que no acaba de trenzarse.

—Luis Alonso



LEONHARD EULER
MATHEMATICAL GENIUS IN THE ENLIGHTENMENT
Ronald S. Calinger
Princeton University Press, 2016

Euler

Luz de la Ilustración

Esta es la primera biografía intelectual completa de Leonhard Euler (1707-1783). Ronald Calinger enmarca sus logros extraordinarios, que le sitúan entre los cuatro grandes de la matemática de todos los tiempos (junto con Arquímedes, Isaac Newton y Carl Friedrich Gauss), en la rutina de la vida diaria. Y, pese al ruego de Pierre-Simon Laplace («Leed a Euler, leed a Euler, es el maestro de todos»), no ha gozado de la atención de los historiadores, ahuyentados quizá por una labor hercúlea, sin par.

Meritorio es, sin embargo, el trabajo de recuperación y edición crítica de sus obras completas, que abarcan más de 80 volúmenes. La serie 1, sobre matemática, consta de 29 volúmenes; la serie 2, sobre mecánica y astronomía, suma 31 volúmenes; la serie 3 comprende 12 volúmenes sobre física y *varia*. La serie 4A contará con 8 volúmenes con versiones anotadas de su extensa correspondencia. A ello hay que agregar el proyecto Legado Euler, base de datos accesible en Internet donde se podrá consultar el catálogo de los manuscritos restantes y una docena de cuadernos que, en conjunto, alcanzan las 4000 páginas. Escribió en latín o en francés la mayor parte de su obra, aunque para algunos textos empleó alemán o ruso. (La historiografía y los trabajos académicos editados por Asociación Matemática de América están en inglés.)

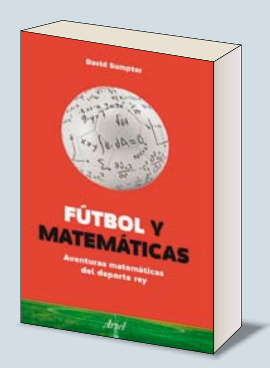
Euler epitomiza la ciencia de la Ilustración. Fue una era de crecimiento, de centralización de los Estados, industrialización, expansión en ultramar de los imperios, fortalecimiento de los ejércitos, aumento de la cultura y generalización de la enseñanza, pasión por la crítica y por el saber matemático y científico de la naturaleza. Los historiadores prolongan ese período hasta el inicio de la Revolución francesa, en 1789. El siglo precedente había sido el de la revolución científica, en el que la matemática y la mecánica celeste habían sido las ciencias por excelencia. No parecía, a comienzos de la Ilustración, que cupiera esperar espectaculares progresos. René Descartes y Pierre de Fermat crearon, cada uno por su lado, la geometría analítica. El período culminó con la invención del cálculo diferencial, con controversia incluida entre Newton y Leibniz.

Terminada su formación en el *Gymnasium*, en 1720, Euler entró en la facultad de filosofía de la Universidad de Basilea,

NOVEDADES



LA LUZ DE SINCROTRÓN
DESCUBRIR LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA
Sebastián Grinschpun
Edicions UAB, 2016
ISBN: 978-84-945163-0-6
164 págs. (16 €)



FÚTBOL Y MATEMÁTICAS
AVENTURAS MATEMÁTICAS DEL DEPORTE REY
David Sumpter
Ariel, 2016
ISBN: 978-84-344-2384-8
328 págs. (19,90 €)

TERAPIAS DE CINE
50 PELÍCULAS BÁSICAS EN TORNO A LA MEDICINA
Carlos Tabernero Holgado
Editorial UOC, 2016
ISBN: 978-84-9116-344-2
220 págs. (19 €)



LA CIENCIA EN LA SOMBRA
LOS CRÍMENES MÁS CÉLEBRES DE LA HISTORIA, LAS SERIES Y EL CINE A LA LUZ DE LA CIENCIA FORENSE
José Miguel Mulet
Destino, 2016
ISBN: 978-84-233-5092-6
220 págs. (17,90 €)



paso obligado para cursar la especialidad en un grado superior. Durante los dos primeros años estuvo en la clase de Johann Bernoulli para principiantes en geometría y en aritmética teórica y práctica. En el otoño de 1723 aprobó el examen de *magister artium* con una conferencia pública en latín donde comparaba la filosofía natural de Descartes con la de Newton.

En 1726, Euler terminó una disertación sobre la propagación del sonido, *De sono*. En 1727 aceptó la invitación de trasladarse a San Petersburgo. Ganó reputación al solucionar el problema de Basilea: cuál era la suma de la serie infinita 1 + 1/4 + 1/9 + 1/16 + ..., que se había resistido a los matemáticos a lo largo de casi un siglo. Euler demostró que la solución era $\pi^2/6$. Aplicó sistemáticamente el cálculo a la mecánica racional desde 1736, con *Mechanica sive motus scientia analytice exposita* («Mecánica, o ciencia del movimiento, expuesta de forma analítica»). Antes de William Rowan Hamilton, fue Euler quien formuló la mayoría de las ecuaciones diferenciales en mecánica. Apoyándose en el trabajo de Alexis Claude Clairaut, demostró en astronomía que la ley del inverso del cuadrado de Newton sobre la gravitación daba cuenta, por sí misma, de todo movimiento lunar. Pero se encontró solo en la creación de un lenguaje matemático que se convertiría en canónico a lo largo de los dos siglos siguientes.

Invitado en 1741 a Berlín por Federico II, publicó su *Introductio in analysin infinitorum*, pergeñó una mecánica del continuo y propulsó una teoría ondulatoria de la luz. Partiendo de los *Principia* de Newton, Euler echó los fundamentos de la mecánica clásica, propuso unos procedimientos novedosos para la solución de problemas y aplicó el cálculo diferencial. Pero nunca se sintió a gusto en el ambiente de la corte. De vuelta, casi ciego ya, a San Petersburgo en 1776, creó un cálculo analítico de variaciones, desarrolló la teoría lunar más precisa de su tiempo, que apoyaba la dinámica de Newton, y publicó *Cartas a una princesa alemana*. Había perdido la visión del ojo derecho 28 años atrás. Ahora, rondando los sesenta, declaraba que la pérdida de visión significaba para él una fuente menos de distracción. En los 17 años restantes de su vida, o póstumamente, se publicaron más de la mitad de sus escritos.

La suya fue una historia de descubrimientos incesantes y de contribuciones a todas las ramas del saber puro y aplicado, especialmente en cálculo, teoría de números, óptica, mecánica celeste, mecánica racional y mecánica de fluidos, sin olvidar sus incursiones en construcción naval, balística, cartografía, cronología y teoría de la música. Solo en cálculo aportó cientos de descubrimientos y pruebas, así como numerosísimos cómputos para simplificar y esclarecer las técnicas de cálculo diferencial, series infinitas y cálculo integral.

En España debemos a Alberto Dou un espléndido trabajo sobre el *Método de máximos y mínimos*, una de las joyas de la literatura matemática del siglo XVII y de todos los tiempos. En él se anticipa el cálculo de variaciones, una poderosa herramienta en física matemática. El método de Euler es hoy en día familiar a todo físico para obtener las ecuaciones de evolución de un sistema a partir del principio de mínima acción. Tanto ese método como ese principio se encuentran en esa obra en su momento naciente.

—Luis Alonso



THE RECOMBINANT UNIVERSITY
GENETIC ENGINEERING AND THE EMERGENCE OF STANFORD BIOTECHNOLOGY
Doogab Yi
The University of Chicago Press, 2015

ADN recombinante

Emergencia de la biotecnología

El advenimiento de la técnica del ADN recombinante en los años setenta marca el hito inicial de la historia de la biotecnología y de la comercialización de la investigación académica. Una técnica y una comercialización que tuvieron su centro de arranque en la comunidad científica del área de la bahía de San Francisco. El patronazgo de la investigación, las fuerzas del mercado y los progresos legales desde finales de los años sesenta hasta comienzos de los ochenta influyeron en la evolución de la técnica y reconfiguraron las coordenadas morales y científicas de la investigación en biomedicina. ¿Qué aconteció en esos años?

Cuando se habla del ADN recombinante y de la ingeniería genética, se alude, por lo común, a la técnica de clonación de Stanley Cohen, del departamento de genética de la Universidad Stanford, y Herbert Boyer, de la Universidad de San Francisco, y su patente de comercialización. Sin embargo, los procedimientos experimentales fueron iniciados en el departamento de bioquímica de Stanford. En un entorno de intensa competitividad, la Universidad Harvard abrió las puertas a James Watson en 1956. Hacia finales de los cincuenta, el Instituto de Tecnología de Massachusetts hizo lo propio con Salvador E. Luria. En el Instituto de Tecnología de California, la biología molecular estaba liderada por Max Delbrück. En 1957, Arthur Kornberg aceptó la creación y dirección del departamento de bioquímica de Stanford. Para levantarlo se llevó consigo a Robert Lehman, Paul Berg, Melvin Cohn, A. Dale Kaiser, David Hogness y Robert Baldwin. El núcleo del grupo de investigación de Kornberg sobresalió en el metabolismo químico de los coenzimas y ácidos nucleicos. Despuntaron en aspectos moleculares clave del gen (replicación del ADN y síntesis de proteínas).

Kornberg, que recibió el premio Nobel en 1959 por su investigación sobre la síntesis de ADN, había trabajado con Severo Ochoa en la Universidad de Nueva York y con Carl y Gerty Cori en la de Washington. Se entregó al estudio de las enzimas, que consideraba la fuerza motriz de la biología. Se empeñó en la búsqueda de una enzima que sintetizara la cadena polinucleotídica de ADN. En 1957, su artículo sobre la síntesis de ADN a partir de sus precursores por la ADN polimerasa fue

rechazado por *The Journal of Biological Chemistry*. En la primavera del año siguiente, un nuevo editor reparó en ese trabajo y lo publicó. En la enzimología de la replicación del ADN seguiría trabajando los siguientes treinta años.

En la distribución del trabajo, Kornberg y Lehman se ocuparon de la síntesis bioquímica y replicación del ADN mediante la polimerasa; a Berg, Hogness y Kaiser les correspondió la regulación genética de células bacterianas y virus para sondear la función genética y bioquímica del ADN. Y, no menos importante, el departamento estableció su propio código moral académico, con particular atención a la producción, intercambio y propiedad del conocimiento y materiales de investigación. Había trasiego constante de resultados, de becarios y doctorandos, de métodos y herramientas (centrífugas o microscopio electrónico). Quienes trabajaban, por ejemplo, en regulación génica bacteriana, el grupo de Kaiser, recibían enzimas críticas para manipular e investigar la actividad biológica del ADN, de los laboratorios de Kornberg y Lehman, y acceder a sus técnicas enzimáticas. Ese sistema compartido les permitía alcanzar economías de escala. Además, facilitaba el diálogo y el debate sobre observaciones y datos de interés. El secreto y la apropiación excluyente se consideraban inmorales.

A finales de los sesenta, Berg y Hogness exploraron nuevas direcciones en la biología de los organismos superiores. Berg adoptó el sistema experimental de virus tumorales animales para explorar la expresión y regulación génica en células de mamífero; ello propició el advenimiento de la técnica del ADN recombinante como herramienta de trabajo para la cartografía génica. La posibilidad de crear, mediante ese método, organismos transgénicos significó el comienzo de un cambio epistemológico en la investigación biomédica. En el otoño de 1970, el laboratorio de Berg se encontraba en la avanzadilla de la técnica del ADN recombinante. David Jackson y Robert Symons lograban allí, un año más tarde, la síntesis in vitro de moléculas de ADN recombinante mediante combinación de dos genes foráneos.

En ese clima de efervescencia de nuevas ideas se iban acometiendo hibridaciones experimentales que ahondaban en la transformación bacteriana y en la clonación génica. Contemporáneamente, Stanley Cohen y Herbert Boyer demostraban experimentalmente la clonación molecular del ADN recombinante a través de una serie de experimentos, en alguno de los cuales intervino John Morrow, del laboratorio de Berg. La relación de Cohen con los bioquímicos llegaba hasta el uso compartido de sus instrumentos, una interacción crítica para convertir a los plásmidos en herramientas de trabajo.

En su empeño por introducir un plásmido circular en bacterias, Cohen acudía a menudo a Peter Lobban. En un principio, solo los bioquímicos de Stanford poseían los recursos técnicos y enzimáticos para sintetizar moléculas de ADN recombinante. Por eso, la solicitud de patente sobre el ADN recombinante por Cohen y Boyer, aquí expuesta con minucioso detalle, desató una controversia durísima sobre la prioridad y propiedad de los avances científicos en asuntos biológicos, controversia que todavía persiste. El imperativo ético sería uno de los sellos distintivos del departamento de bioquímica. En julio de 1974 firmaron, con otros, una carta en la que solicitaban una moratoria en la investigación sobre ADN recombinante para conjurar el miedo de la sociedad a la creación de plagas, la alteración de la evolución humana o la degradación del entorno [*véase* «Debate sobre el ADN recombinante», por Clifford Grobstein; Investigación y Ciencia, septiembre de 1977].

—*Luis Alonso*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Julio 1966

Alunizaje suave

«A unos mil kilómetros del lugar donde la nave espacial rusa *Luna 6* hizo su primer alunizaje controlado en febrero, el vehículo estadounidense *Surveyor I* tomó tierra en el mar de las Tormentas y empezó a enviar miles de imágenes. Estas muestran un área con el aspecto de un "campo recién volteado" con piedras y guijarros que asoman sobre una fina capa de polvo. Los cojines de aterrizaje de la nave imprimieron unas huellas de dos o tres centímetros de hondo y proyectaron unos minúsculos "rayos" parecidos a los que podría haber producido un pequeño meteorito. Todas las pruebas indican que la superficie puede soportar sin dificultades el peso tanto de astronautas como de naves espaciales.»

Economía alimentaria

«La pequeña granja avícola no puede competir con la eficiencia del moderno rancho mecanizado. Hoy la avicultura requiere grandes inversiones, una gran especialización técnica, perspicacia empresarial y menos mano de obra. El papel de la carne de ave en la dieta estadounidense representa un cambio no menos acusado que el de la posición de la industria avícola dentro de la agricultura. El pavo o el pollo fueron en tiempos unos bocados especialmente reservados para domingos y festivos; hoy son alimentos básicos cotidianos. La carne de ave compite ahora en precio con la carne roja y el pescado y se ofrece bajo novedosas y apetecibles formas. La tradicional y noble gallina, que solía necesitar varias horas de cocción para hacerse comestible, ha sido relegada a las latas de comida canina y sustituida en el mercado por el ave frita o asada y el pollo precocinado.»



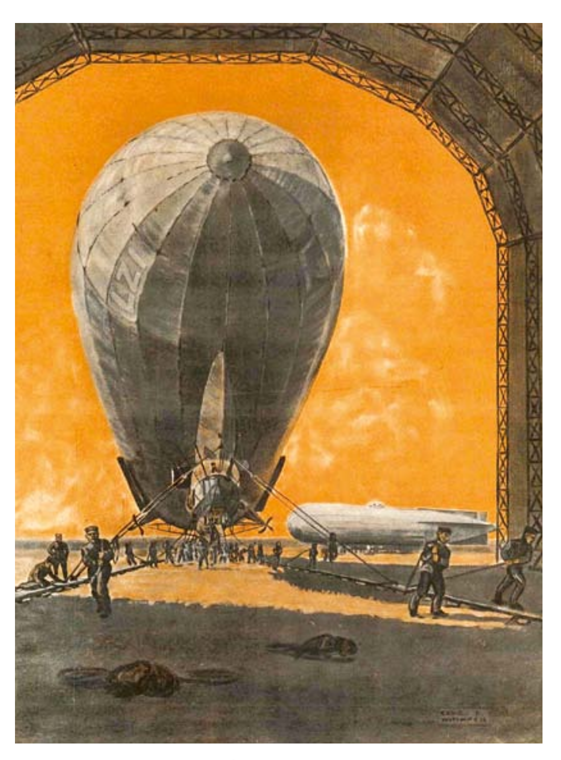
Julio 1916

El amarre de los zepelines

«Para sujetar un zepelín de gran tamaño durante la entrada a su hangar, inamovible frente a un viento cuya velocidad excede tan largamente a la de las corrientes marinas, se requieren casi tantos hombres como los necesarios para sujetar un vapor contra la marea. Como ya no hay galeotes disponibles y hoy es tanto el precio del trabajo manual, se necesita un procedimiento de amarre de los zepelines más acorde con el espíritu de la época actual. Ello se consigue con un tendido de raíles a cada lado que se adentran en el hangar, con unas abrazaderas con ruedas que se deslizan por ellos suavemente y que se amarran a los costados de la nave mediante cabos (*véase la ilustración*).»

Lubricando el tiempo

«En estos nuestros apresurados tiempos, en que hasta los segundos cuentan en el mundo de los negocios, puede que suene paradójico decir que debemos nuestra puntualidad y ahorro de tiempo a la juguetona marsopa. Pero así es ciertamente, pues los relojes, cualquiera que sea su clase, e incluso los más dignos cronómetros, no funcionarían regularmente un mes tras otro si no fuera por el lubricante obtenido de la quijada del animal. Se trata de un aceite con la singular propiedad de conservar la fluidez en todas las estaciones. Un aceite de reloj no debe oxidarse, ni evaporarse, ni enranciarse. Tan rigurosas condiciones solo las cumple en su totalidad el aceite de quijada de marsopa, y no es de extrañar que ya refinado se venda al por mayor en torno a los 7 dólares el litro.»



1916: EL ZEPELÍN, grande y frágil, a salvo de las inclemencias bajo su cavernoso hangar.



Julio 1866

Pensando en el helicóptero

«Recientemente, el señor H. F. Wenham leyó ante la Sociedad Aeronáutica de Gran Bretaña una ponencia titulada "Algunas observaciones acerca de la locomoción aérea y las leyes por las cuales se sustentan los cuerpos pesados propulsados a través del aire". Se citan en la ponencia varios experimentos, los cuales muestran que hacen falta entre 6,6 y 8,8 caballos de potencia por cada 100 kilogramos que se eleven en la atmósfera mediante una hélice que rote con su eje vertical, y el autor concluye de estos experimentos que toda máquina construida según ese principio, para elevar o transportar cuerpos pesados, está condenada al fracaso, pues no disponemos de una fuente motriz continua suficientemente ligera ni siquiera para sustentar su propio peso.»

Los rigores de julio

«Es probable, si no cierto, que nunca en la historia de este país se dio un verano de calor tan riguroso como este que hemos padecido. En la clase de geografía de la escuela se nos decía que el clima de las zonas templadas se compone de "extremos de calor y frío". Ello es literalmente verdad. No es exagerado afirmar que aquí [en Nueva York] las temperaturas de los termómetros durante la primera quincena de julio se parecen mucho a las del ecuador. La vida se ha reducido al simple esfuerzo de atenerse al habitual consejo de "no se acalore".»

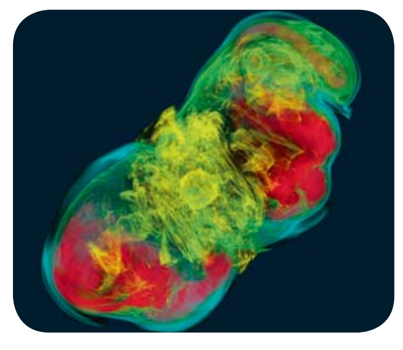
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXV, N.° 3, 15 DE JULIO DE 1916

ASTROFÍSICA

Supernovas extrañas

Por Daniel Kasen

Cada año, miles de estrellas explotan en una desconcertante variedad de formas. Los astrónomos quieren saber qué las hace estallar.



SALUD

¿Sigue causando defectos congénitos el agente naranja?

Por Charles Schmidt

Vietnam insiste en que aún hay niños afectados por el tristemente célebre defoliante empleado hace décadas por Estados Unidos. Las pruebas al respecto son controvertidas.



EVOLUCIÓN

El éxito evolutivo de los mamíferos

Por Stephen Brusatte y Zhe-Xi Luo

Hallazgos fósiles recientes revelan que, mucho antes de que un asteroide acabara con la hegemonía de los dinosaurios, los mamíferos ya estaban sentando las bases de su futuro dominio en el planeta.

INFORME ESPECIAL:
LA EDAD DE ORO
DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Máquinas que aprenden solas

Por Yoshua Bengio

El valor de la experiencia para los robots

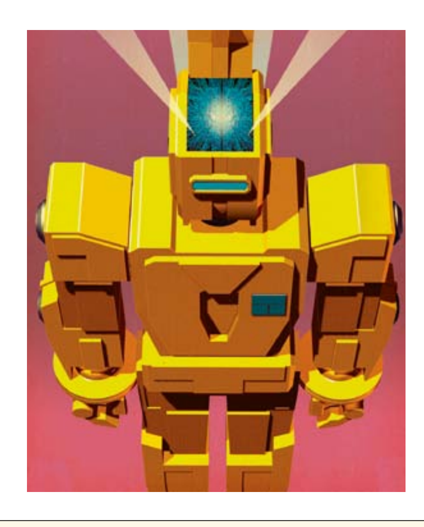
Por Ramón López de Mántaras

La verdad sobre los coches «autónomos»

Por Steven E. Shladover

¿Hemos de temer a los robots superinteligentes?

Por Stuart Russell



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y ¿Saben los animales de dónde vienen?*; Cayetano González: *División celular asimétrica en el desarrollo animal*; Javier Grande: *Nacido del caos*; Juan M. González Mañas: *La desesperante sensación de picor*; Carmen Bañuls: *Computación cuántica modular*; Ana Fernández del Río: *La privacidad en la era cuántica*; Alfredo Marcos: *Las teorías en ciencia*; Mercè Piqueras: *Retos de la agricultura urbana*; Marco Rios Schmid: *La guerra de las lenguas*; Joandomènec Ros: *Una cura para el suelo de África*; Carlos Lorenzo: *Gigantes alados del pasado*; J. Vilardell: *Física del botijo y Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España